
Università degli Studi di Napoli Federico II
Facoltà di Ingegneria



Daniela De Gregorio

VULNERABILITÀ VULCANICA
DEI CENTRI URBANI IN ZONE
AD ELEVATO RISCHIO:
IL CASO VESUVIO

*Tesi di Dottorato
XXIII ciclo*

*Il Coordinatore
Prof. Ing. Federico M. MAZZOLANI*

*Il Tutor
Prof. Ing. Federico M. MAZZOLANI*

*Il Co-tutor
Dr. Ing. Beatrice FAGGIANO*

Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Costruzioni

Indice

INTRODUZIONE	pag.	1
1 L'ATTIVITÀ ERUTTIVA E IL RISCHIO VULCANICO		3
1.1 Introduzione al rischio vulcanico		3
1.2 I vulcani		8
1.2.1 Origine dei vulcani		8
1.2.2 Distribuzione geografica dei vulcani		13
1.2.3 L'attività vulcanica		16
1.2.4 La previsione delle eruzioni		23
1.3 Il rischio vulcanico delle aree urbanizzate		30
1.3.1 Esposizione delle aree urbane agli effetti vulcanici ..		30
1.3.2 Il rischio vulcanico in Italia		34
2 IL RISCHIO VULCANICO NELL'AREA NAPOLETANA		44
2.1 I tre vulcani partenopei		44
2.1.2 Somma- Vesuvio		44
2.1.3 Campi Flegrei		48
2.1.4 Ischia		53
2.2 Il sistema di sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano		56
2.3 Il rischio Vesuvio e Campi Flegrei		58
2.4 I Piani di Emergenza		65
3 INCIDENZA DELLE ERUZIONI VULCANICHE SUL COSTRUITO		74
3.1 Fenomeni legati alle eruzioni vulcaniche		74
3.2 Le lave		75
3.2.1 Fenomeno		75
3.2.2 Azione ed effetti sul costruito		84
3.3 I depositi da caduta		86
3.3.1 Fenomeno		86
3.3.2 Azione ed effetti sul costruito		89
3.4 I flussi piroclastici e i surges		93

3.4.1	Fenomeno	93
3.4.2	Azione ed effetti sul costruito	103
3.5	I missili vulcanici	108
3.5.1	Fenomeno	108
3.5.2	Azione ed effetti sul costruito	110
3.6	I terremoti vulcanici	118
3.6.1	Fenomeno	118
3.6.2	Azione ed effetti sul costruito	120
3.7	I lahars	122
3.7.1	Fenomeno	122
3.7.2	Azione ed effetti sul costruito	126
3.8	Gli tsunami	130
3.8.1	Fenomeno	130
3.8.2	Azione ed effetti sul costruito	141
3.9	Combinazione delle azioni	144
4	METODOLOGIE PER L'ANALISI DI VULNERABILITÀ	148
4.1	Vulnerabilità sismica	148
4.1.1	Metodi di valutazione della vulnerabilità sismica	148
4.1.2	Metodologie GNDT di I e II livello	152
4.1.3	Scheda MEDEA	158
4.1.4	Scheda per il rilievo di beni monumentali	164
4.2	Vulnerabilità vulcanica	170
4.3	Proposta di una metodologia per la valutazione della vulnerabilità vulcanica	184
4.3.1	Metodi multi- criterio	184
4.3.2	Proposta di metodologia speditiva	193
4.3.2	Proposta di metodologia meccanica	199
5	AREE CAMPIONE ALL'INTERNO DELL'AREA VESUVIANA	205
5.1	Attività di rilievo nell'ambito del progetto COST Action C26	205
5.1.1	Aree d'indagine	205
5.1.2	Torre del Greco e il Vesuvio	208
5.1.3	Le Ville del Miglio d'Oro	211
5.2	Centro storico di Torre del Greco	212
5.3	Area residenziale di Torre del Greco	218
5.4	Complessi scolastici di Torre del Greco	220
5.5	Ville Vesuviane	223
6	ANALISI DELLE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE VESUVIANE TIPICHE	228
6.1	Le tipologie costruttive vesuviane	228
6.2	Telai in c.a.	229
6.2.1	Edilizia ordinaria	229
6.2.2	Edilizia scolastica	244
6.3	Strutture murarie	273
6.4	Coperture	277

6.5	Elementi di chiusura	287
7	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ VULCANICA IN AREA VESUVIANA ..	290
7.1	Metodologia EXPLORIS	290
7.1.1	Centro storico di Torre del Greco	290
7.1.2	Area residenziale e scuole di Torre del Greco	294
7.2	Metodologia speditiva proposta	296
7.2.1	Complessi scolastici in c.a. di Torre del Greco	296
7.2.2	Le Ville Vesuviane	299
8	INTERVENTI DI MITIGAZIONE	303
8.1	Le lave	303
8.2	I depositi da caduta	310
8.3	I flussi piroclastici e i missili vulcanici	312
8.4	I terremoti vulcanici	313
8.5	I lahars	313
8.6	Gli tsunami	314
	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	315
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	317
	GLOSSARIO	327
	RINGRAZIAMENTI	333

Introduzione

Nel corso nei secoli, le eruzioni vulcaniche hanno seminato morte e distruzione. Le vittime causate dagli eventi documentati sono circa 260.000. Oggi, quasi 500 milioni di persone, concentrate in particolare ai tropici, sono soggette a rischio vulcanico. Grandi conurbazioni, come Tokyo, Città del Messico, Seattle, Napoli, si trovano solo ad alcune decine di chilometri da vulcani con un'elevata probabilità di eruzione. Inoltre, alti tassi di crescita della popolazione urbana dei paesi in via di sviluppo sono causa di grande preoccupazione, trovandosi molte città proprio sopra le cinture tettoniche, che ospitano la grande maggioranza dei vulcani più esplosiva al mondo.

La messa in sicurezza di queste popolazioni richiede la pianificazione di strategie di mitigazione che, per poter essere attuate, necessitano di un'attenta valutazione del rischio vulcanico. In prospettiva, oggetto della presente tesi di dottorato è l'analisi della vulnerabilità vulcanica dei centri urbani in zone ad elevato rischio, con particolare riferimento al caso Vesuvio.

Il lavoro svolto si è sviluppato nell'ambito del progetto europeo COST Action C26 *Urban habitat constructions under catastrophic events* (2006-2010, prof. F.M. Mazzolani chair), che, nell'ottica della valutazione degli effetti delle azioni catastrofiche sul costruito urbano, ha dedicato specifica attenzione all'esame della vulnerabilità di una delle regioni europee con il maggior rischio vulcanico: l'area vesuviana. Nelle zone circostanti il vulcano partenopeo, infatti, una situazione di elevata criticità è prodotta dalla coesistenza di tre fattori: l'elevato valore esposto, dovuto alla abnorme densità abitativa (circa 600.000 persone nel raggio di 6-7km dal cratere); l'alta probabilità che un'eruzione esplosiva pliniana o sub- pliniana di verifichi nei

prossimi decenni, e la particolare vulnerabilità degli insediamenti urbani nei confronti degli eventi eruttivi.

Le attività di studio e ricerca svolte sono di seguito illustrate. Esse sono articolate in otto capitoli, anche se sostanzialmente possono essere raggruppate in tre fasi.

L'aspetto preliminare riguarda l'esame del fenomeno eruttivo, del rischio ad esso associato e della schematizzazione, in termini di azioni sulle strutture investite, di tutti i fenomeni potenzialmente generati da un'eruzione (lave, depositi da caduta, flussi piroclastici e surges, missili e terremoti vulcanici, lahars e tsunami).

La parte centrale, invece, è relativa alla messa a punto di una metodologia di valutazione della vulnerabilità vulcanica articolata su due livelli: il primo di tipo speditivo semeiotico, valido anche per i beni monumentali e basato su metodi multi- criteri; ed il secondo di tipo meccanico, basato sul concetto della *robustness*. Questa proposta di metodologia, affiancata ad analisi strutturali non lineari, termo-meccaniche, è utilizzata per un esame della vulnerabilità delle tipologie costruttive in area vesuviana, individuate attraverso specifiche campagne di rilievi in sito.

Infine, l'ultima fase consiste nell'indicazione di interventi di mitigazione, in ragione delle diverse azioni prodotte dal fenomeno eruttivo sulle costruzioni.

Capitolo 1

L'attività eruttiva e il rischio vulcanico

1.1 INTRODUZIONE AL RISCHIO VULCANICO

Fin dai tempi preistorici la vita umana è stata influenzata dalle catastrofi naturali. Uragani, alluvioni, terremoti ed eruzioni vulcaniche sono stati responsabili di milioni di morti ed i loro effetti hanno spesso messo in pericolo la sopravvivenza di intere civiltà. Talvolta le popolazioni sono state attratte verso zone particolarmente esposte alle catastrofi geologiche dalla fertilità agricola, dalla posizione strategica dei luoghi o da altri fattori di carattere culturale.

Il numero di vite umane perse in conseguenza dei disastri naturali rende l'idea della relativa importanza dei vari fenomeni. Le vittime causate dalle eruzioni documentate sono circa 260.000 (Tabella 1.1), di cui circa l'80% in soli sei eventi (Tambora 1815, Krakatoa 1883, Pelée 1902, Nevado del Ruiz 1985, Vesuvius 1631, Unzen 1792), mentre soltanto dal 1900 ad oggi si stima che almeno sei milioni di persone abbiano perso la vita a seguito di terremoti (Earthquake Hazard Program, 2010). Nello stesso periodo, sono morte 2.350.000 persone a causa di cicloni e tornado e circa 350.000 persone a causa di tsunami. La peggiore catastrofe vulcanica di cui si ha conoscenza (quella del Tambora nel 1815) ha causato circa 92.000 morti, mentre il maggior numero di vittime causato da un uragano è stato di 500.000 (1970, ciclone Bhola, Bangladesh) e addirittura, nel disastroso terremoto del 1976, a Tang Shan in Cina, persero la vita più di 799.000 persone.

Tabella 1. 1. Vittime prodotte dalle eruzioni vulcaniche (USGS, 2010).

Anno	Vulcano	Paese	Vittime
79dC	Mount Vesuvius	Italy	3.360
1586	Mount Kelut	Indonesia	10.000
1631	Mount Vesuvius	Italy	18.000
1775	Tseax Cone	Canada	2.000
1783	Mount Asama	Japan	1.151
1792	Mount Unzen	Japan	15.000
1815	Mount Tambora	Indonesia	92.000
1822	Mount Galunggung	Indonesia	4.000
1883	Krakatoa	Indonesia	36.000
1886	Mount Tarawera	New Zealand	120
1887	Cotopaxi	Ecuador	1.000
1897	Mount Mayon	Philippines	1.335
1902	Soufrière	St. Vincent, Carribean	1.680
1902	Santa Maria	Guatemala	6.000
1902	Mount Pelée	Martinique	33.000
1911	Mount Taal	Philippines	1.335
1912	Mount Kelut	Indonesia	5.115
1930	Mount Merapi	Indonesia	1.369
1951	Mount Lamington	Papua New Guinea	2.942
1953	Mt Ruapehu	New Zealand	152
1963	Mount Agung	Indonesia	1.584
1980	Mount St. Helens	United States	57
1982	El Chichón	Mexico	3.500
1985	Nevado del Ruiz	Colombia	23.000
1991	Mount Pinatubo	Philippines	700
1997	Soufrière Hills	Montserrat, Carribean, UK	20
2002	Nyiragongo	Democratic Republic of the Congo	245
2010	Merapi	Indonesia	322
			264.987

Nonostante gli eventi vulcanici sollevino talvolta più impressione di altri fenomeni naturali, da queste cifre appare evidente che in realtà essi pongono meno problemi rispetto ad altre catastrofi più frequenti e in molti casi anche più prevedibili. Questo non toglie nulla alla capacità di distruzione di un evento eruttivo, ma mette in risalto come le conseguenze siano particolarmente legate alla presenza di insediamenti umani in prossimità di apparati vulcanici le cui aree risultano comunque relativamente piccole se

confrontate con quelle esposte alla possibilità di inondazioni, frane e terremoti.

Gli effetti di un'eruzione possono essere risentiti immediatamente nel corso dell'evento o in periodi successivi. In generale si possono suddividere gli agenti potenzialmente pericolosi in *diretti* e *indiretti*, a seconda che gli effetti siano immediatamente ascrivibili al fenomeno vulcanico oppure che siano da esso indotto. Un esemplificazione di questa classificazione è stata proposta da Bernstein et al. (1986) ed è illustrata in Tabella 1.2.

Tabella 1. 2. Classificazione degli effetti di un'eruzione (Bernstein et al.,1986).

Classe di pericolosità	Esempio di effetti plausibili
Diretta e immediata	<p>Pericoli potenziali per colate di lava, flussi piroclastici, esplosioni, terremoti, etc</p> <p>Pericolo potenziale per inalazione di cenere e gas (irritazione delle vie respiratorie per SO₂, HCl o HF, peggioramento di pre-esistenti malattie delle vie respiratorie; asfissia per CO₂, intossicazione da H₂S o CO; soffocamento per cenere vulcanica), ingestione di acqua contaminata da agenti chimici</p> <p>Pericolo potenziale psicologico, ambientale ed economico derivante da: propagazione di false notizie o incertezza riguardo ai pericoli potenziali; distruzione di sistemi di servizi; distruzione delle proprietà; spostamento di grandi masse di persone in ricoveri temporanei.</p>
Diretta e ritardata	Malattie respiratorie per prolungata respirazione o esposizione a gas tossici o ceneri
Indiretta ed immediata	<p>Pericoli derivanti da valanghe di fango, inondazioni, incendi e maremoti</p> <p>Pericoli sanitari derivanti dallo scoppio di epidemie endemiche dovute alla distruzione dei servizi di routine di sanità ed igiene Indiretta e ritardata</p> <p>Pericoli sanitari per l'aumento di agenti infettivi e tossici e la diminuzione dei meccanismi di difesa polmonari.</p> <p>Pericoli psicologici, sociali ed economici derivanti dalla distruzione della struttura della società</p>

Questo modo di classificare la pericolosità potenziale dell'attività vulcanica implica la necessità di analizzare in dettaglio tutte le conseguenze di un'eruzione e di predisporre i mezzi opportuni a fronteggiare una emergenza, qualora se ne ponga la necessità. Si tratta cioè di analizzare i possibili scenari eruttivi e di predisporre le misure adeguate a minimizzare gli effetti

dell'eruzione nel momento in cui si prospetta come molto probabile l'evento. Molto spesso ci si trova di fronte al problema di vulcani che potrebbero tornare in attività dopo un periodo di riposo più o meno prolungato. Lunghi periodi di quiescenza sono abbastanza comuni in certi apparati vulcanici e questo fatto può comportare nel tempo una caduta di allerta e può creare una serie di situazioni inadeguate (urbanizzazione, viabilità non sufficientemente scorrevole, ecc.) a fronteggiare un pericolo che potrebbe manifestarsi improvvisamente. In questi casi è necessario identificare tutte quelle aree che potrebbero essere interessate dalla ripresa di attività. Si tratta cioè di fare una valutazione di "Rischio vulcanico" basata sulla passata storia del vulcano.

Il Rischio vulcanico è definito (Unesco, 1972, Fournier d'Albe, 1979) dal seguente prodotto:

$$\text{Rischio} = (\text{Valore}) \times (\text{Vulnerabilità}) \times (\text{Hazard}) \quad (1.1)$$

dove il *Valore* è dato dal numero di vite umane, oppure dal valore in beni immobili, a rischio in un'area vulcanica; la *Vulnerabilità* è il valore percentuale delle vite umane (o beni) a rischio in conseguenza di un dato evento, e l'*Hazard* è la probabilità che una data area sia soggetta ad un determinato evento vulcanico distruttivo. Con questa definizione di rischio si cerca di tener conto del fenomeno naturale e della probabilità con cui si ripete nonché degli effetti che esso può determinare sull'ambiente umano.

L'elemento di maggiore difficoltà nella stima del rischio è l'Hazard, a causa delle incertezze relative alla valutazione della probabilità di eruzione del vulcano. Questa stima è ancora più complessa quando il vulcano ha lunghi periodi di quiescenza e presenta poche eruzioni in epoca storica. Di conseguenza, diventa anche più difficile la ricostruzione della sua storia eruttiva, la cui accuratezza rappresenta la base per un lavoro di previsione. La vita di un vulcano abbraccia periodi di tempo dell'ordine delle decine o centinaia di migliaia di anni e, per ricostruire la sua storia eruttiva, bisogna ricorrere a metodologie differenti che siano in grado di coprire spazi temporali così vasti rispetto alla durata della vita umana. I documenti storici permettono uno studio accurato solo per quello che riguarda le ultime centinaia di anni. La lunghezza del periodo storico ricoperto da testimonianze è però variabile a seconda delle aree geografiche. L'area italiana è particolarmente "fortunata" in quanto sede delle più antiche civiltà testimoni di buona parte degli eventi

vulcanici negli ultimi 2500 anni. In altre aree del mondo, come ad esempio gli Stati Uniti, si dispone di testimonianze dirette dell'attività vulcanica solo per gli ultimi 100 anni. Gli studi geologici sono utilizzati per ricostruire la storia vulcanologica di un particolare vulcano soprattutto dove non si hanno altri tipi di informazioni. Con le datazioni assolute si possono stimare, partendo dai prodotti, le età delle varie eruzioni.

La Vulnerabilità è stimata invece sulla base della relativa pericolosità dei differenti eventi vulcanici.

Il rischio vulcanico può essere mitigato attraverso una serie di attività di prevenzione di seguito riassunte:

- Studi di pericolosità. Ricostruendo la storia eruttiva del vulcano in oggetto e tenendo conto dello stato in cui il vulcano si trova attualmente, è possibile fare previsioni sul tipo di eruzione attesa più probabile.
- Scenari di riferimento ed elaborazione di mappe di pericolosità e rischio. Una volta individuato il tipo di eruzione più probabile, è possibile predisporre degli scenari eruttivi (anche attraverso lo sviluppo di modelli di simulazione fisico- matematici) ed elaborare delle mappe di pericolosità e rischio.
- Pianificazione d'emergenza. I piani di emergenza, redatti sulla base di uno o più scenari eruttivi e delle corrispondenti mappe di pericolosità, prevedono tutte le azioni da intraprendere in caso di crisi e generalmente contemplano l'evacuazione della popolazione dalle aree esposte a pericolo. Sono stati elaborati i piani nazionali di emergenza vulcanica per il Vesuvio e i Campi Flegrei (attualmente in fase di aggiornamento), mentre altri piani analoghi sono in corso di stesura per i vulcani siciliani.
- Pianificazione territoriale. E' importante che il rischio vulcanico sia tenuto in debita considerazione nella pianificazione del territorio, al fine di evitare nuove costruzioni nelle aree esposte.
- Riduzione della vulnerabilità. E' fondamentale ridurre la vulnerabilità delle costruzioni sottoposte ad alcune fenomenologie vulcaniche, specie se di minore impatto (es. caduta e accumulo di ceneri).

- Attività di educazione e informazione delle popolazioni esposte al rischio. Un ambiente sostenibile è un ambiente informato, dunque, iniziative educative, soprattutto nelle scuole, volte a incrementare la conoscenza dei rischi, dei piani di emergenza, delle norme di comportamento sono alla base di un'intelligente coesistenza con il vulcano.

1.2 I VULCANI

1.2.1 *Origine dei vulcani*

Il termine *vulcano* indica una spaccatura della crosta terrestre attraverso la quale fuoriescono, con andamento generalmente discontinuo, materiali gassosi, liquidi e solidi ad alta temperatura (Figura 1.1). Il *vulcanismo*, cioè la scienza che studia questi fenomeni, indaga sulle cause connesse al trasferimento di materia ed energia dall'interno verso l'esterno del pianeta; queste ricerche hanno individuato, nella forma più tipica dell'impianto, un apparato vulcanico interno ed uno esterno.

L'apparato vulcanico interno è costituito dalla camera magmatica, dal condotto vulcanico e dal cratere. La camera magmatica (o focolare) è una zona non molto profonda della litosfera (generalmente compresa fra i 3 e i 10 chilometri) in cui ristagna la pasta ignea (dal latino *ignis* = fuoco) alimentatrice dei prodotti vulcanici. Il condotto (o camino) vulcanico è la spaccatura attraverso la quale ascende il magma (da un termine greco che significa *impasto*). Infine il cratere (dal greco *kratér* = coppa) è lo sbocco esterno del camino, che presenta una conformazione a guisa di voragine più o meno ampia.

L'apparato vulcanico esterno è rappresentato dal rilievo che costituisce il prodotto della stessa attività vulcanica in quanto deve la sua formazione ai materiali espulsi attraverso il cratere durante le eruzioni. Questo è il motivo per cui, quasi sempre, gli apparati vulcanici hanno la forma di un tronco di cono regolare. L'aspetto dell'edificio vulcanico, tuttavia, dipende anche dal tipo di lave eruttate (lava, dal latino *labēs* = scivolare). Le lave fluide riescono ad espandersi coprendo in breve tempo distanze anche di molti chilometri,

mentre le lave viscose si fermano presto e danno luogo a coni vulcanici ripidi. Come anticipato, il monte vulcanico potrebbe anche mancare perché il cratere, invece che come un foro, potrebbe presentarsi come una lunga frattura del terreno.

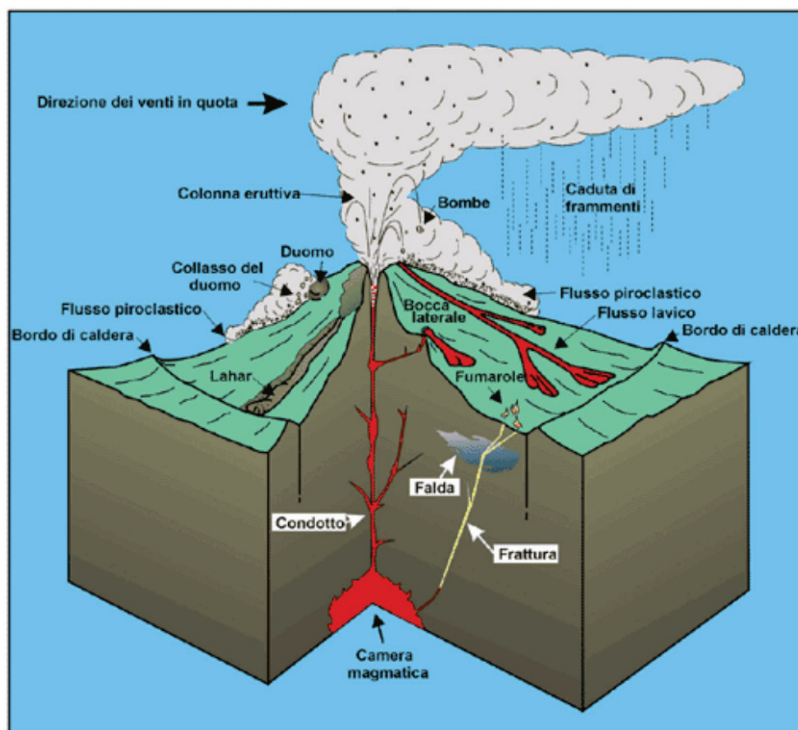
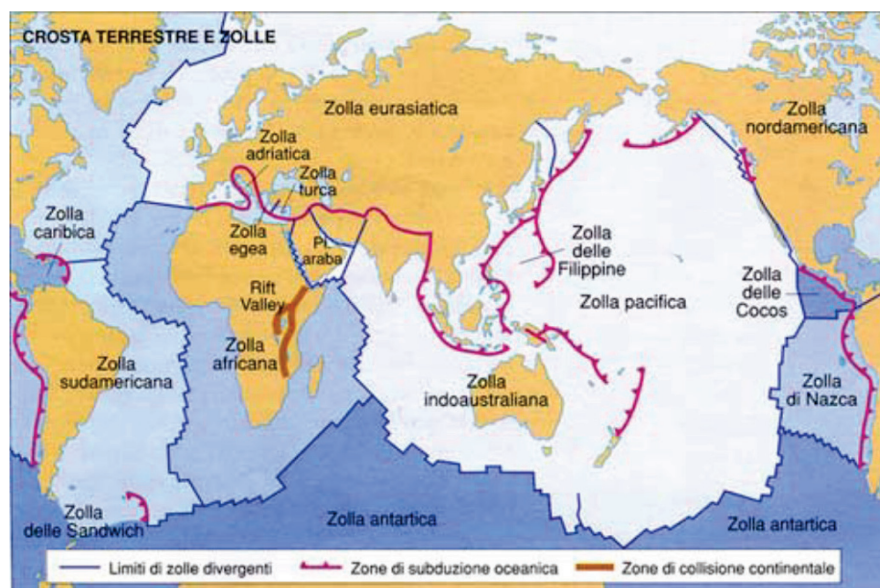
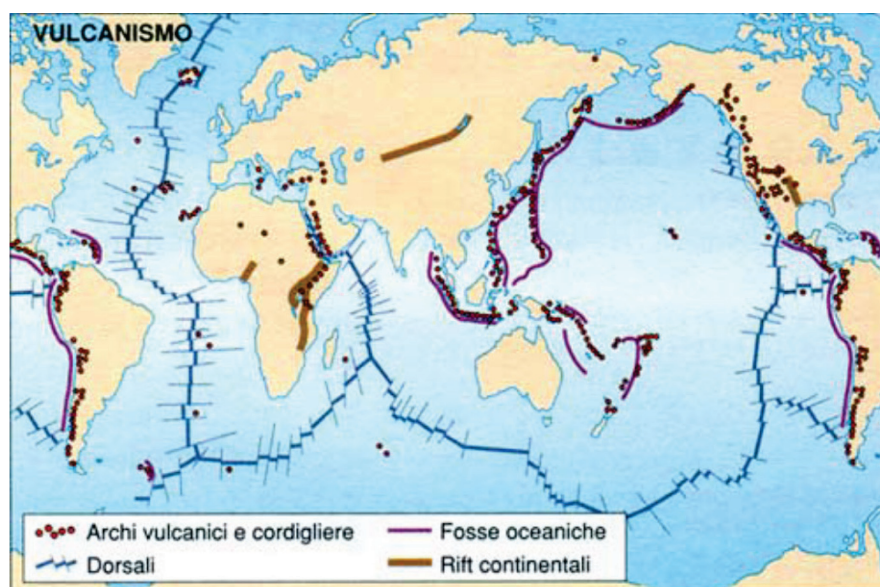


Figura 1. 1. Schema interattivo dei fenomeni annessi all'attività eruttiva di un vulcano (Osservatorio Vesuviano, 2010).

L'origine dei vulcani è spiegabile attraverso la *Teoria della tettonica delle placche* (o *delle zolle*), secondo la quale la crosta terrestre non è un blocco unico, ma si presenta spezzata in porzioni di litosfera dette appunto *zolle* o *placche*, le quali, in alcuni casi, portano su di sé i continenti e, in altri, formano semplicemente i fondi oceanici (Figura 1.2). Tutti questi enormi zatteroni sono in continuo movimento reciproco: in alcuni casi premono l'uno contro l'altro, in altri casi si allontanano fra di loro e in altri ancora scivolano l'uno a fianco dell'altro.



a)



b)

Figura 1. 2. a) Crosta terrestre e zolle. b) Vulcanismo (vialattea.net, 2010)

Quando le zolle collidono può accadere che una di esse si immerga sotto l'altra in zone dette di subduzione fino a raggiungere gli strati profondi e caldi della litosfera dove i materiali che le costituiscono in parte fondono. Se però da una parte i margini delle zolle sprofondano sparendo nelle viscere della

Terra da qualche altra parte deve formarsi nuova crosta se non si vuole ammettere che la Terra si sgonfi come un pallone bucato.

Le ricerche condotte sui fondi oceanici hanno individuato la zona in cui si forma nuova crosta. Nelle profondità marine, gli oceanografi hanno scoperto una sinuoso sistema di rilievi sottomarini che si estende per 65.000 chilometri tutto intorno alla Terra in una zona più o meno centrale degli oceani. Questa formazione presenta al centro, in tutta la sua lunghezza, una profonda fessura (in inglese, *rift valley*) dalla quale esce in continuazione del materiale magmatico che proviene dalla zona più profonda del mantello.

La teoria della tettonica a zolle prevede che nel mantello sottostante la litosfera, a causa di differenze di temperatura generate da materiali radioattivi, si vengano a formare enormi celle convettive. I rami ascendenti di due cellule contigue (l'una destrorsa e l'altra sinistrorsa) trasportano del materiale caldo che, in parte, tende ad insinuarsi entro la sovrastante litosfera. Questo processo di intrusione è favorito dal fatto che i rami ascendenti delle due celle una volta giunti alla base della litosfera divergono dirigendosi lateralmente ed esercitando in questo modo trazioni che provocano l'allargamento della frattura da cui escono i materiali magmatici, che spingono lateralmente i due monconi della piattaforma oceanica verso i continenti opposti.

Ciò che risale direttamente dalla parte più profonda del mantello è un magma basico e quindi povero di silice, il quale solidificando dà origine a rocce basaltiche che vanno a costituire i fondi oceanici ripristinando ciò che nelle zone di subduzione era scomparso. Ben diverse sono le lave che escono dai vulcani che si trovano sulle catene montuose costiere o sugli archi insulari che si sono formati in seguito all'immersione di una placca oceanica pesante sotto una continentale più leggera. In questi casi si formano magmi che, avendo stazionato a lungo nella camera magmatica dove hanno subito processi di contaminazione con rocce di altra natura e depositato alcuni minerali pesanti, hanno mutato la composizione originaria che da basica è divenuta acida. Questo materiale, quando viene espulso dal vulcano e solidifica, dà origine a rocce ricche di minerali di quarzo (silice cristallina) e di silicati con alto contenuto in silice come ad esempio i feldspati.

La teoria della tettonica a zolle spiega anche la natura dei vulcani islandesi: la dorsale medio-atlantica emerge e quindi è possibile assistere in superficie a ciò che normalmente avviene nel fondo oceanico. La stessa teoria è ancora in

grado di dare una giustificazione coerente dell'anomalia dei vulcani di tipo hawaiano, cioè di quei vulcani che si trovano al centro delle zolle e che sembrano distribuiti casualmente. Quest'ultimo fenomeno si spiega immaginando una colonna relativamente stazionaria di materiale incandescente che, risalendo da zone profonde, si dirige verso la superficie dove crea i cosiddetti "punti caldi" (in inglese, *hot spots*). La zolla che si muove sopra questi pennacchi (in inglese, *plumes*) roventi subisce una serie di sfondamenti successivi con formazione di vulcani allineati lungo la direttrice di spostamento della zolla stessa. E' un po' lo stesso fenomeno che si realizzerebbe su di un cartoncino che si muovesse lentamente sopra la fiamma immobile di una candela: ogni tanto sul cartoncino si aprirebbe un buco creato dalla fiamma sulla quale si muove. L'arcipelago hawaiano costituisce l'esempio più classico del fenomeno: esso è formato da una catena di isole vulcaniche allineate regolarmente dalle più antiche alle più recenti. Quelle più antiche sono piccole perché esposte per più tempo agli agenti atmosferici e formate da vulcani spenti, mentre i vulcani attivi si trovano sull'isola di Hawaii all'estremità orientale dell'arcipelago. I vulcani attivi posti sull'isola maggiore in ordine da sud-est a nord-ovest sono i seguenti: Kilauea, Mauna Loa, Hualalai e Mauna Kea.

Se le eruzioni sottomarine invece di avvenire a duemila o più metri di profondità come accade nelle dorsali oceaniche fossero poco profonde si svilupperebbero esplosioni di vapore che porterebbero alla formazione di isole più o meno grandi e più o meno effimere. Questo è il caso ad esempio dell'isola Ferdinanda così chiamata in onore di Ferdinando II di Borbone, re delle due Sicilie, o Giulia (perché nata nel mese di luglio) che affiorò nell'estate del 1831 fra la Sicilia e Pantelleria, e che alla fine dell'eruzione aveva raggiunto un'altezza di circa 65 metri ed un perimetro di quasi quattro chilometri. I primi a giungere sul luogo furono gli inglesi che la ribattezzarono Graham e vi piantarono la loro bandiera. Per l'incoerenza del materiale la nuova isola rapidamente scomparve e di essa oggi è rimasta traccia in una secca che è indicata sulle carte nautiche con il nome di Banco Graham.

Un fenomeno pressoché analogo si ebbe nel novembre del 1963 quando un'eruzione sottomarina portò all'emersione dell'isola vulcanica di Surtsey (cioè l'isola di Surtur, il gigante di fuoco dell'antica mitologia norvegese), al largo dell'Islanda. Questa nuova isola, che tuttora esiste, ha una superficie di

meno di due chilometri quadrati e raggiunge i 180 metri di altezza. La comparsa di questa nuova isola interessò non soltanto i geologi, ma anche i biologi in quanto offriva loro l'opportunità unica al mondo di studiare l'ordine di comparsa di organismi viventi in un ambiente temperato-freddo.

Esiste quindi una profondità critica al di sotto della quale la pressione idrostatica della colonna d'acqua sovrastante impedisce qualsiasi attività esplosiva e la lava che esce tranquillamente dal condotto si raffredda molto bruscamente a contatto con le gelide acque profonde degli oceani; rotolando alla base della colata essa tende a scomporsi in blocchi tondeggianti formando le cosiddette "lave a cuscino" (in inglese, *pillow lave*) distanti centinaia di metri dal punto di fuoriuscita.

1.2.2 Distribuzione geografica dei vulcani

I vulcani presenti sulla terra non sono distribuiti in modo uniforme sulla superficie terrestre. Il 99% di essi è concentrato solo in alcune aree, sede, tra l'altro, di frequenti terremoti (Figura 1.3).

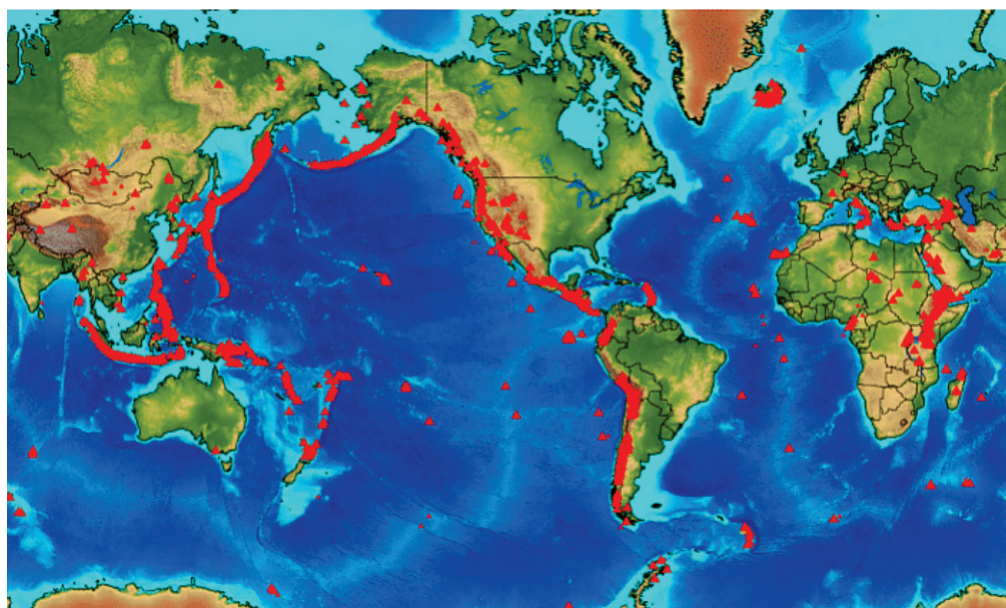


Figura 1. 3. Distribuzione geografica dei vulcani (Siebert and Simkin, 2002).

In particolare, la maggioranza dei vulcani sono localizzati in fasce ristrette che rivelano maggiore instabilità e che rappresentano solo un decimo della crosta terrestre. La distribuzione geografica degli oltre 500 vulcani attivi del pianeta rivela pertanto uno stretto collegamento con le aree di corrugamento recente e di frattura della crosta terrestre. L'attività magmatica in alcuni casi si realizza infatti presso i limiti di placca divergenti, cioè in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche e in prossimità delle fosse tettoniche mentre, in altri casi, è localizzata presso i limiti di placca convergenti cioè in corrispondenza delle zone in cui le zolle tendono ad avvicinarsi l'una all'altra.

Il tipo di vulcanismo nei due casi è molto diverso per origine e composizione dei magmi nonché per carattere e pericolosità delle eruzioni. Anche i magmi prodotti sono molto diversi perché diverse sono le rocce originarie coinvolte nella fusione.

Una lunga e imponente serie di vulcani attivi (il 70% del totale) si estende ad arco lungo l'orlo dei continenti che si affacciano sull'Oceano Pacifico formando la cosiddetta *CINTURA DI FUOCO CIRCUMPACIFICA*. Si tratta di un insieme di vulcani sabaerei che comprende quelli sistemati sul versante occidentale delle Americhe, su quello orientale dell'Asia e sugli archi insulari del Giappone, delle Filippine e della Nuova Guinea. Sono tutti vulcani fortemente esplosivi i cui prodotti (in gran parte piroclastici) sono in prevalenza di natura acida anche se non mancano quelli basici. L'ambiente geodinamico che sta all'origine di tale vulcanismo è quello delle fosse di subduzione: una condizione che giustifica la natura dei materiali emessi, generati a loro volta dalla fusione parziale delle rocce della camera magmatica e dalla successiva differenziazione del materiale in essa contenuto.

Altre zone ricchissime di vulcani sono le *DORSALI MEDIO-OCEANICHE*. In questo caso, la maggior parte delle eruzioni sono sommerse e quindi generalmente inosservate, ma in alcuni casi le sommità dei coni emergono a formare delle isole per l'appunto di origine vulcanica. Fanno parte, ad esempio, della dorsale medio-atlantica gli edifici che culminano nelle isole Azzorre, Canarie, Capo Verde e Sant'Elena per proseguire, nell'altro emisfero, con Ascensione e Tristan da Cunha. La stessa grande isola dell'Islanda in parte può essere considerata una culminazione della dorsale. Analoghi casi si hanno lungo le dorsali dell'Oceano Indiano e dell'Oceano Pacifico.

Un terzo distretto di intensa attività vulcanica è la cosiddetta *ZONA DEI MEDITERRANEI* che comprende i vulcani del mare delle Antille (es. La Pelée), del nostro Mediterraneo (Etna, Stromboli, Vulcano, Vesuvio, Santorini, ecc.) e delle isole della Sonda (con i terrificanti Krakatoa e Tambora).

Un'ultima grande fascia di attività vulcanica è la zona delle grandi fratture dell'Africa che dal Madagascar sale attraverso la regione dei grandi laghi africani (Kilimangiaro, Kenya, Ruwenzori) fino ai distretti eruttivi dell'Etiopia, dell'Eritrea e della costa arabica.

Per concludere non va dimenticato il fatto che non tutti i fenomeni vulcanici avvengono in corrispondenza dei margini delle placche. Vi sono anche i vulcani che si formano al centro delle placche litosferiche stabili alimentati dai cosiddetti punti caldi. L'esempio più tipico è quello dei vulcani hawaiani.

Secondo il Catalogo dei Vulcani Attivi del Mondo (CAVW Editors, 1971-1975) rivisto dall'Associazione di Vulcanologia e Chimica dell'Interno della Terra (IAVCEI), i vulcani attivi del mondo vengono suddivisi nelle seguenti 19 regioni (Figura 1.4):

Regione 1:	dall'Europa al Caucaso;
Regione 2:	Africa e Mar Rosso;
Regione 3:	Medio Oriente e Oceano Indiano);
Regione 4:	Nuova Zelanda e isole Fiji;
Regione 5:	Melanesia e Australia;
Regione 6:	Indonesia e Isole Andatane;
Regione 7:	Filippine e Asia SE;
Regione 8:	Giappone, Taiwan e Isole Marianne;
Regione 9:	Isole Kurili;
Regione 10:	Kamchatcka e Asia continentale;
Regione 11:	Alaska;
Regione 12:	Canada e USA Occidentale;
Regione 13:	Hawaii e Oceano Pacifico;
Regione 14:	Messico e America Centrale;
Regione 15:	Sud America;
Regione 16:	Indie Occidentali;

Regione 17: Islanda e Oceano Artico;
 Regione 18: Oceano Atlantico;
 Regione 19: Antartide e Isole Sandwich Meridionali.

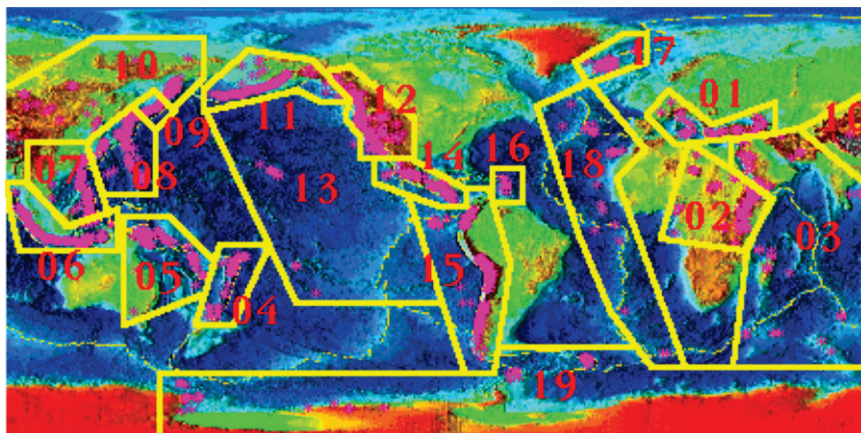


Figura 1. 4. Le regioni dei vulcani attivi (DST, 2010, www.dst.unina.it).

In particolare, la Regione 1 comprende i vulcani attivi italiani (sub-region 0101):

- 0101-01 Campi Flegrei (Campania)
- 0101-02 Vesuvio (Campania)
- 0101-03 Ischia (Campania)
- 0101-04 Stromboli (Isole Eolie)
- 0101-041 Lipari (Isole Eolie)
- 0101-05 Vulcano (Isole Eolie)
- 0101-06 Etna (Sicilia)
- 0101-07 Campi Flegrei Mar di Sicilia (Sicilia)
- 0101-071 Pantelleria (Sicilia)

1.2.3 *L'attività vulcanica*

Per prevedere le conseguenze di un evento vulcanico è indispensabile conoscere le varie modalità attraverso cui il fenomeno può manifestarsi in superficie.

Quando un magma si viene a trovare in condizioni tali da raggiungere la superficie esterna del pianeta, si ha una eruzione vulcanica. Questa può verificarsi tramite l'espulsione di un magma come un continuo liquido a viscosità variabile che fluisce lungo la superficie, eventualmente frammentandosi durante il flusso, oppure tramite la violenta espulsione di miscele di gas e materiale solido o parzialmente fuso, frammentato a causa della espansione esplosiva dei volatili contenuti nel magma o a causa dell'istantanea vaporizzazione di acqua esterna al sistema, che può venire a contatto con il corpo magmatico. Nel primo caso l'eruzione viene detta *effusiva*, e il suo prodotto è una colata lavica; nel secondo caso l'eruzione viene detta *esplosiva* e determinerà la messa in posto di una vasta gamma di prodotti piroclastici.

Un primo requisito fondamentale, necessario perché si abbia un'eruzione effusiva (Figura 1.5), è un contenuto in volatili essolti nel magma sufficientemente basso da evitare che la loro pressione sia in grado di determinarne la frammentazione esplosiva. Poiché, eccezion fatta per alcuni magmi basici e ultrabasici, il contenuto in volatili della maggior parte dei magmi sarebbe sufficiente a determinarne la frammentazione esplosiva, è necessario che il magma degassi prima di venire a giorno. Questo può avvenire o per allontanamento graduale dei volatili attraverso fumarole o sorgenti idrotermali, o rapidamente, attraverso episodiche esplosioni freatiche. Allo stesso modo, una o più fasi eruttive a carattere esplosivo, possono determinare l'allontanamento della maggior parte dei gas da una camera magmatica, consentendo la tranquilla effusione del magma ancora presente, sotto forma di colate laviche, nelle fasi terminali di un ciclo eruttivo.

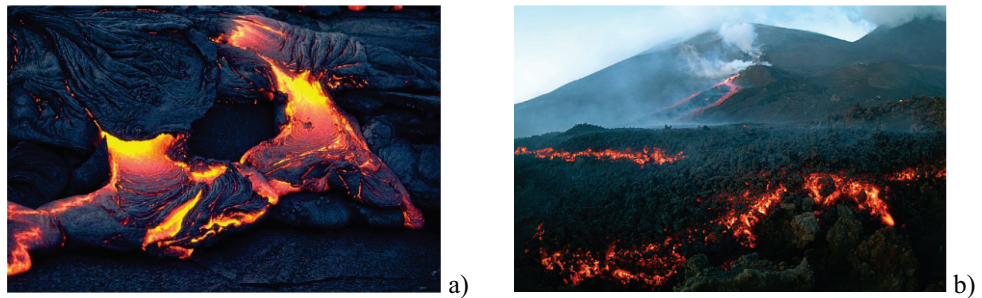


Figura 1. 5. Esempi di eruzioni effusive: a) vulcano Kilauea, Hawaii; b) vulcano Etna, Italia. (Alean et al., 2010. www.swisseedu.ch)

Le eruzioni *esplosive*, invece, sono caratterizzate da estrema esplosività e da un'alta colonna eruttiva che si espande verso l'alto con una tipica nube di cenere a forma di pino. Esse vengono anche dette “pliniane”, prendendo il nome da Plinio il Vecchio che morì durante l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C. e da Plinio il Giovane che la descrisse.

Nelle eruzioni vulcaniche esplosive il rapido rilascio e la decompressione dei gas magmatici, o l'istantanea vaporizzazione di acqua esterna, determina la frammentazione del magma prima che questo venga a giorno e la sua espulsione sotto forma di una miscela di gas, particelle solide e liquide.

Se la frammentazione del magma è dovuta alla sola espansione esplosiva dei volatili contenuti nel magma, l'eruzione è detta *magmatica*. Se la frammentazione avviene con il contributo di acqua di origine esterna (acqua di falda o superficiale) che, venendo a contatto con il magma vaporizza espandendosi in maniera esplosiva, l'eruzione viene detta *freatomagmatica*. Nel caso in cui si abbia una esplosione dovuta alla sola vaporizzazione di acqua di falda, senza che in superficie vengano eruttati frammenti del magma che innescano l'esplosione, allora l'eruzione è definita *freatica*.

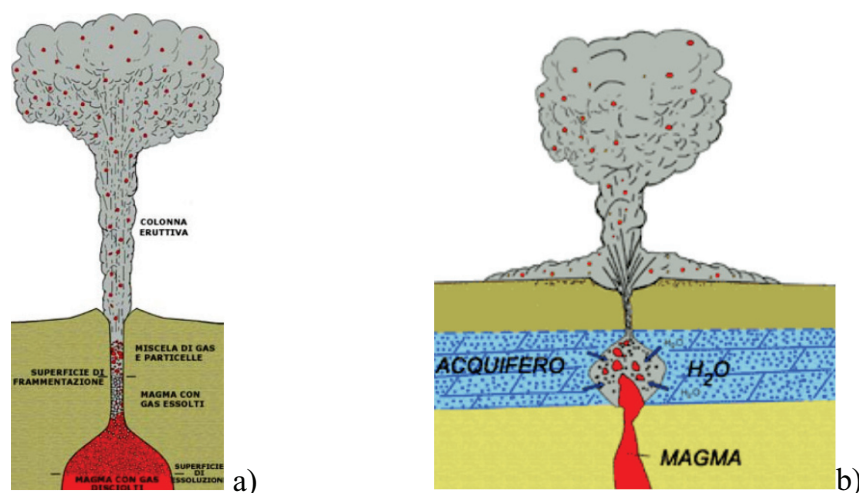


Figura 1. 6. Eruzioni esplosive: a) magmatiche; b) freato-magmatiche.
(Osservatorio Vesuviano, 2010 www.ov.ingv.it)

Il primo studio che descrive e classifica le eruzioni vulcaniche esplosive in relazione ai depositi da caduta fu effettuato da Walker nel 1973 (Figura 1.7).

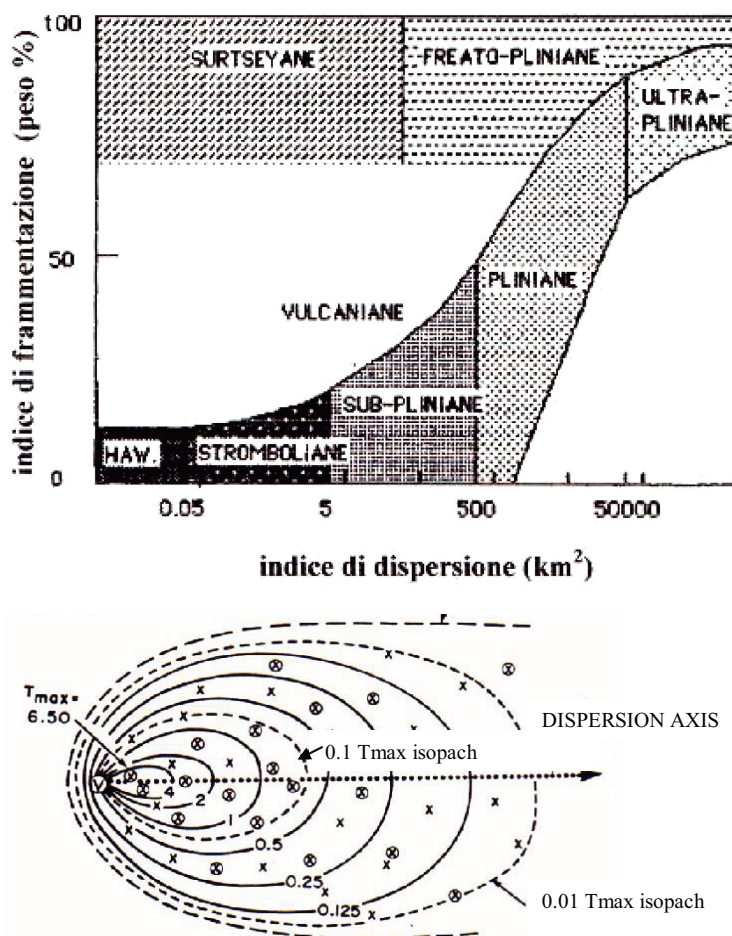


Figura 1. 7. Schema di classificazione delle eruzioni in base all'indice di dispersione (D) e all'indice di Frammentazione (F) secondo Walker (Waker, 1973).

Egli costruì uno schema quantitativo che si basa su un'accurata misurazione degli spessori dei depositi da caduta e sull'analisi granulometrica degli stessi per determinare due parametri: la dispersione (D) ed l'indice di frammentazione (F) del deposito. La *dispersione* di un deposito da caduta (D) è definita come l'area racchiusa nella isopaca (curva di uguale spessore) che

raccorda i punti in cui lo spessore del deposito è pari all'1% dello spessore massimo. La *frammentazione* (F) invece è definita come la percentuale di particelle più fini di 1mm, nel punto in cui l'asse di dispersione del deposito interseca l'isopaca che raccorda i punti in cui il deposito ha uno spessore pari al 10% dello spessore massimo.

Lo schema di classificazione di Walker è di tipo genetico e prevede una prima distinzione in due gruppi delle eruzioni esplosive.

Il primo gruppo comprende eruzioni *magmatiche* che, in ordine crescente di dispersione e frammentazione, possono così essere schematizzate: eruzioni hawaiane, stromboliane, sub-pliniane, pliniane ed ultrapliniane.

Il secondo gruppo comprende le eruzioni *freatomagmatiche* e comprende due sole categorie: eruzioni surtseyane ed eruzioni freatopliniane. Questi due tipi di eruzione occupano il settore del diagramma di Walker a più elevato grado di frammentazione, mentre un tipo intermedio di eruzione in cui l'interazione tra acqua e magma gioca un ruolo più o meno importante, che comprende le eruzioni *vulcaniane*, si colloca in una porzione centrale del diagramma.

Le differenti altezze delle colonne pliniane relative alle eruzioni descritte da Walker sono illustrate in Figura 1.8: 2km per le eruzioni hawaiane, 10km per quelle stromboliane, 30km per quelle sub-pliniane e 55km per quelle pliniane ed ultrapliniane.

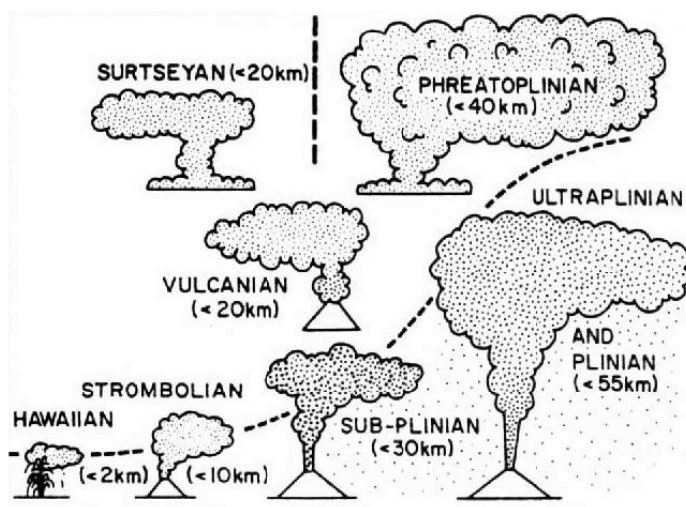


Figura 1. 8. Diagramma dell'altezza della colonna eruttiva in funzione dell'esplosività/grado di frammentazione. (Cas e Wright, 1988).

Uno schema di classificazione semiquantitativo delle eruzioni è stato proposto da Newhall e Self nel 1981 e adottato dalla Smithsonian Institution nella compilazione del catalogo mondiale delle eruzioni (Simkin et al, 1981). L'indice prende il nome di *indice di esplosività vulcanica* (VEI= Volcanic Explosivity Index) e si basa su una serie di parametri osservabili nel corso di un'eruzione, combinati in maniera tale da fornire una scala di relativa grandezza fra i vari eventi. Lo schema è stato particolarmente pensato per formulare una classificazione dell'esplosività di un'eruzione e quindi non permette un'adeguata classificazione degli eventi puramente effusivi. In Tabella 1.3 è riportato lo schema con il quale l'indice viene valutato. Volume dei materiali estrusi, altezza delle nubi eruttive ed osservazioni qualitative (usando termini che vanno dal "leggero" al "mega-colossale") vengono utilizzati per valutare la capacità esplosiva di un'eruzione. È una scala indefinita che va da 0, per un'eruzione non esplosiva (meno di 10^4 m^3 di materiale piroclastico emesso), fino a 8, per eruzioni mega-colossali che possono emettere 10^{12} m^3 di clasti, con una colonna di cenere alta più di 25km. Ogni intervallo di scala rappresenta un incremento di un fattore 10 nell'osservazione. Un difetto della VEI è che non tiene conto della densità dei materiali eruttati: ceneri vulcaniche, bombe vulcaniche e ignimbriti vengono considerate in egual modo. Inoltre la VEI non tiene conto della dimensione del potere eruttivo di un'eruzione.

Tabella 1. 3. Schema di classificazione delle eruzioni basato sull'indice di esplosività VEI. (Newhall e Self, 1982).

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descrizione generale	non esplosiva	piccola	moderata	moderata-grande	grande	molto grande			
Log ₁₀ Volume [m ³]	4	4÷6	6÷7	7÷8	8÷9	9÷10	10÷11	11÷12	>12
Altezza colonna [km]	dal cratere			dal livello del mare					
	<0,1	0,1÷1	1÷5	3÷15	10÷25	>25			
Descrizione qualitativa	non esplosiva	moderata	esplosiva	violenta	cataclism.	parossist.	colossale	super-colossale	mega-colossale
Classificazione	←-----Stromboliana-----→			←-----Vulcaniana-----→		←-----Pliniana-----→		←-----Ultra-Pliniana-----→	
	←-----Hawaiana-----→		←-----Vulcaniana-----→		←-----Pliniana-----→		←-----Ultra-Pliniana-----→		
Durata [ore di emissione continua]	←-----<1-----→			←-----1÷6-----→		←----->12-----→			
			←-----1÷6-----→						
			←-----6÷12-----→						
Iniezione troposferica	trascurab.	minore	moderata	sostanziosa -----→					
Iniezione stratosferica	←-----nessuna-----→			possibile	sicura	notevole -----→			

Sebbene lo schema sia largamente qualitativo, ha tuttavia il pregio di permettere una stima della "grandezza" delle eruzioni anche basandosi su una semplice descrizione dell'evento. Questo dato è molto importante in quanto consente di attribuire un ordine di grandezza anche ad eruzioni avvenute nel passato. Ne è un esempio la classificazione riportata in Tabella 1.4.

Tabella 1. 4. Classificazione di alcune eruzioni storiche in funzione dell'indice VEI (USGS, 2010).

VEI	Tipo di eruzione	Altezza della nube	Frequenza	Esempio
0	non esplosiva	< 100 m	ogni giorno	Kilauea
1	moderata	100-1000 m	ogni giorno	Stromboli
2	esplosiva	1-5 km	settimanale	Galeras, 1992
3	violenta	3-15 km	annuale	Ruiz, 1985
4	catastrofica	10-25 km	decennale	Galunggung, 1982
5	parossistica	> 25 km	secolare	Mt Sant Elena, 1980
6	colossale	> 25 km	secolare	Krakatoa, 1883
7	super-colossale	> 25 km	millenaria	Tambora, 1815
8	mega-colossale	> 25 km	ogni 10.000 anni	Yellowstone, 2 mil. anni fa

Eventi con un indice VEI inferiore o uguale a di 3 sono di tipo effusivo o con una bassa esplosività ed esibiscono effetti localizzati. Eventi con VEI pari a 4 o 5, invece, possono avere gravi ripercussioni sulle economie regionali e addirittura, eventi con VEI pari a 6 sono in grado di produrre variazioni del clima dell'intero pianeta. Uno degli eventi vulcanici di maggiore entità del XX secolo è quello del Pinatubo (Filippine) del 1991, con VEI 6. La più recente manifestazione con VEI 7 risale, invece, al 1815, quando, in Indonesia, il vulcano Tambora causò la morte di 92.000 persone ed un cambiamento climatico nel breve termine che distrusse la gran parte delle colture del Nord America e dell'Europa (Rampino e Self, 1992). Oggi, un evento di questa portata in prossimità di un grande area urbana sarebbe devastante non solo per la città in questione, ma perturberebbe l'intera economia mondiale a causa dei relativi cambiamenti climatici globali.

Fortunatamente, eventi con indice VEI pari a 8 sono rari e, nell'Olocene (cioè da 11.700 anni fa ad oggi), non ve n'è alcun esempio. Probabilmente, l'ultima eruzione di questo tipo si è verificata con il vulcano Toba nell'isola di Sumatra, circa 74.000 mila anni fa.

1.2.4 *La previsione delle eruzioni*

Spesso l'eruzione di un vulcano quiescente è preceduta dal verificarsi di una serie di fenomeni indicativi di uno stato anomalo del vulcano stesso. Questi fenomeni, anche se vengono definiti *precursori*, non sono altro che un processo vulcanico già in atto.

Il fatto che anticipino l'eruzione vera e propria di un periodo di tempo più o meno lungo dipende da fattori che al momento restano in gran parte sconosciuti. Non ha quindi molto senso parlare di precursori di lungo, medio o corto periodo, in quanto gli stessi fenomeni possono durare per tempi molto diversi, a seconda della natura fisica del vulcano e dei magmi connessi. Da questo si comprende come uno dei compiti primari della vulcanologia sia quello di ricostruire un modello fisico di vulcano che permetta di elaborare delle previsioni sul suo comportamento, soprattutto per i vulcani che si trovano in fase quiescente da lungo tempo e per i quali le modalità eruttive sono poco note.

Pur essendo il quadro dei fenomeni premonitori tutt'altro che chiaro, il verificarsi di una serie di essi indica una situazione anomala in profondità o segnala addirittura il possibile arrivo di magma a livelli superficiali. Anche se sono poche le informazioni relative ai tempi caratteristici dei fenomeni precursori, in generale si è notato che le eruzioni effusive di magmi basaltici sono anticipate da fenomeni della durata di pochi giorni, mentre le eruzioni di magmi più differenziati hanno precursori con tempi più lunghi. Questa differenza può essere legata ai differenti meccanismi eruttivi con cui avvengono le eruzioni effusive e quelle esplosive.

Oltre alla difficoltà nel valutare la durata dei fenomeni precursori, la previsione di un evento eruttivo è difficile anche per il fatto che l'eruzione rappresenta una discontinuità nel comportamento fisico del sistema vulcanico. Prima dell'eruzione, il sistema è prossimo a una condizione di instabilità e ogni piccola variazione dei fattori che ne controllano lo stato può avere effetti determinanti e, dunque, si dovrebbe tenere sotto controllo un numero di parametri che spesso sfuggono a qualsiasi misura. Proprio la complessità del fenomeno è una delle ragioni per le quali le risposte di un vulcanologo risultano spesso imprecise o ambigue.

Fra i vari tipi di osservazioni che vengono fatte per controllare lo stato di un vulcano le più usate risultano le seguenti (Scandone e Giacomelli, 1998):

- *Le deformazioni del suolo.* Un'iniezione di magma al di sotto o all'interno di un edificio vulcanico provoca normalmente un piccolo ma rilevabile rigonfiamento (inflazione), temporaneo o permanente, dell'apparato stesso. Il verificarsi di un'eruzione o della migrazione del magma in fessure laterali, può provocare uno sgonfiamento dell'edificio (deflazione).

Alcuni esempi storici di vistose deformazioni del suolo che hanno accompagnato o preceduto delle eruzioni sono, la variazione della linea di costa avvenuta prima dell'eruzione del 1538 di Monte Nuovo nei Campi Flegrei (Parascandola, 1947), il rigonfiamento di un campo arato prima dell'eruzione del Paricutin (Messico) del 1943 e l'eruzione dell'Usu (Giappone) del 1944. Non sempre le deformazioni del suolo in aree vulcaniche sono immediatamente seguite da eruzioni. Ad esempio, il sollevamento della zona dei Campi Flegrei nel 1970 e 1982 e della caldera di Long Valley nel 1980-83 non hanno, a tutt'oggi, segnato l'inizio di una ripresa di attività, mentre a Rabaul (Papua, Nuova Guinea) dove fra il 1971 ed il 1984 si erano registrate deformazioni analoghe e, nel settembre del 1994, si è verificata un'eruzione.

- *La sismicità nelle aree vulcaniche.* Una variazione delle condizioni di pressione nel serbatoio magmatico o una migrazione di magma possono causare terremoti al di sotto di un vulcano. Nel caso delle eruzioni vulcaniche, l'esperienza indica che a volte il numero dei terremoti aumenta con l'approssimarsi dell'eruzione. A volte, però, un aumento della sismicità, come nel caso della registrazione di uno sciame sismico, cioè di centinaia di terremoti in poco tempo, avviene senza essere seguito da un'eruzione. I precursori sismici possono avere intervalli di tempi molto variabili da vulcano a vulcano e anche da eruzione a eruzione nello stesso vulcano. Alcuni precursori sismici sono stati seguiti da un'eruzione a distanza di un anno o più (es. Krakatau, 1883; Nevado del Ruiz, 1985), altri di molti anni (Rabaul, 1994), ma nella maggior parte dei casi i tempi sono di settimane o di mesi (St. Helens, 1980; Pinatubo, 1991). In alcuni casi i precursori sismici si avvertono

pochi giorni o ore prima dell'eruzione (Krafla, Islanda, 1975-82; gran parte delle eruzioni del Kilauea; Usu, 1977; Redoubt, 1989-90).

La sorveglianza sismica di un'area vulcanica consiste nell'osservare i terremoti che vi avvengono, nel catalogarli e nel cercare di capire se essi mostrano andamenti più o meno regolari nello spazio e nel tempo. Ci si aspetterebbe che il movimento verso la superficie di una certa quantità di magma provochi terremoti a profondità sempre più basse. In realtà un andamento simile è stato osservato solo raramente e i casi sono citati ad esempio. Più spesso, la sismicità sotto il vulcano appare distribuita casualmente e, talvolta, si osserva addirittura una migrazione dei terremoti verso il basso nel corso dell'eruzione. Altre volte, insieme a un aumento generale del numero di terremoti nel tempo, si è osservato anche un incremento nei terremoti superficiali rispetto a quelli profondi. Questo fatto è ritenuto un sintomo dell'approssimarsi di un'eruzione.

- *Altri precursori.* Altri fenomeni sporadici possono essere considerati precursori di un'eruzione. Ad esempio, l'avvicinarsi del magma può causare un aumento di temperatura alla superficie del vulcano, anche se questo processo è limitato dalla bassa conducibilità termica delle rocce. Le fumarole, originate dal riscaldamento dell'acqua di falda e frequenti anche su vulcani quiescenti da lungo tempo, possono avere variazioni di temperatura e di composizione chimica prima di un'eruzione. Infatti, una risalita di magma può aggiungere nuovi tipi di gas ai vapori delle fumarole e causarne un aumento di temperatura e la variazione di composizione chimica. Se le fumarole emettono vapore acqueo, la loro temperatura può innalzarsi fino al punto di ebollizione dell'acqua a quella profondità, mentre la composizione chimica può variare solo se vi è essoluzione di gas magmatici.

Per meglio comprendere la natura di questi fenomeni si è ritenuto opportuno riportare il quadro dei precursori osservato con la ripresa di attività del vulcano St. Helens negli Stati Uniti dopo un periodo di riposo di 123 anni (Lipman e Mullineaux, 1981 & Foxworthy e Hill, 1982).

Alle 15.37 del 20 marzo 1980 i sismografi della rete sismica dell'Università di Seattle, Stato di Washington nel Nord-Ovest degli Stati

Uniti, registrarono un terremoto di magnitudo 4.1, localizzato sotto il vulcano St. Helens. Il terremoto fu seguito da una serie di altre scosse più piccole, con una sequenza diversa da scossa principale-repliche e con caratteristiche simili a quelle di uno sciame.

Il giorno successivo, 21 marzo, quattro stazioni sismiche addizionali furono installate in prossimità del vulcano, al fine di ottenere una migliore localizzazione degli eventi. Nel frattempo, l'attività sismica continuava ad aumentare e si registrarono terremoti di magnitudo 4.

Il 23 marzo, i sismologi di Seattle intuirono che la sismicità fosse un segnale di imminente ripresa dell'attività vulcanica. Tuttavia, i voli di ricognizione sulla cima del vulcano, alto circa 3000 metri, non mostrano altro che alcune valanghe causate dai terremoti. Solo il 25 marzo, fu possibile osservare nella neve la formazione di una fessura sulla cima del vulcano. Lo stesso giorno venne proibito l'accesso alla zona compresa entro circa 3 miglia dalla cima del vulcano.

Il 27 alle 12.30, fu osservata la prima esplosione di cenere e vapore. In quello stesso giorno venne diramato l'allerta ufficiale di rischio per possibile eruzione vulcanica. Da quel momento in poi furono osservate numerose altre esplosioni, mentre il cratere alla sommità del vulcano continuava ad allargarsi per effetto delle continue esplosioni. L'analisi delle ceneri emesse mostrò che si trattava di materiale rimaneggiato senza presenza di magma iuvenile e, quindi, le esplosioni dovevano essere provocate dal riscaldamento di acque di falda.

Il 1° aprile si notò un allargamento del cratere e un rigonfiamento di tutto il fianco Nord del vulcano. Alle 19:25 dello stesso giorno, i sismografi registrarono la prima comparsa di tremore sismico. Il numero dei terremoti giornalieri cominciò a diminuire, mentre aumentava il numero di quelli a magnitudo più elevata. Nel mese di aprile l'attività continuò senza grandi variazioni, ma il confronto fra le foto aeree fatte nel luglio del 1979 e quelle del 12 aprile 1980 mostrava un rigonfiamento del fianco Nord del vulcano che, in alcuni punti, superava gli 80 metri.

Il 23 aprile, iniziarono le misure distanziometriche tramite geodimetri a laser, con caposaldi posti sul fianco Nord dell'edificio vulcanico. In precedenza erano stati installati dei tiltmetri, per misurare la variazione di inclinazione del suolo, che avevano confermato il progressivo rigonfiamento.

Alla fine di aprile diminuì il numero giornaliero di terremoti, anche se l'energia liberata rimase pressoché costante per i numerosi terremoti con magnitudo superiore a 4. Il fianco Nord della montagna continuò ad espandersi, ma con velocità di deformazione inferiore a quella osservata all'inizio di aprile. Nonostante questi segni apparentemente rassicuranti, la zona di divieto di accesso venne estesa fino a distanze fra tre e otto miglia dalla montagna. Questa misura venne adottata principalmente per il pericolo di frane indotte dalla instabilità dei pendii.

Alla fine di aprile, il sistema di sorveglianza attorno al vulcano era costituito da 15 stazioni sismiche, 5 tiltmetri, 14 riflettori per misure distanziometriche, 6 stazioni per la misura dell'accelerazione di gravità e tre magnetometri a lettura continua. Il Geological Survey coordinava tutte queste ricerche con un ufficio a Vancouver a circa 50km dal vulcano. All'inizio di maggio il vulcano continuava la sua attività in maniera pressoché costante.

Il 18 maggio il vulcanologo Dave Johnston si trovava sul fianco Nord del vulcano per eseguire misure di deformazione ed analisi di gas. Alle 8.32, senza alcun altro avvertimento, un terremoto di magnitudo 5.2 scosse il vulcano. Contemporaneamente, due geologi che stanno sorvolando il cratere osservarono il distacco e il franamento dell'intero fianco Nord del vulcano. Mentre la frana era in corso, essi videro sorgere nubi di vapore dai lati della frana e dalla nicchia di distacco. Una nube di cenere si espanse velocemente dal fianco franato e si propagò ad una velocità di circa 100km/ha verso Spirit Lake. Tutto il lato Nord del vulcano venne rimosso da un'esplosione laterale che devastò circa 550km² di territorio. La colonna eruttiva pliniana raggiunse quote superiori ai 27km e continuò ininterrottamente per circa 10 ore, emettendo circa 0.25-0.5km³ di nuovo magma e distruggendo 2.5km³ di montagna (Figura 1.9).

Molti esempi riportati in letteratura dimostrano che non esiste attualmente un modo per prevedere l'inizio di un'eruzione con accuratezza deterministica, cioè non è possibile determinare in maniera non equivoca il tempo, il luogo e l'entità di una futura eruzione. Paradossalmente, il problema della previsione dell'inizio di un'eruzione è in qualche modo secondario rispetto al problema della previsione del tipo di eruzione e del momento in cui questa raggiungerà la massima intensità. Molto spesso, l'inizio dell'eruzione non coincide con la fase più pericolosa che può verificarsi a distanza di giorni o anche di mesi. Ciò

rende estremamente difficile il compito dei vulcanologi nel momento in cui vengono consultati per predisporre misure di evacuazione. Confrontando la successione dei precursori di alcune eruzioni, si nota come in alcuni casi la fase più violenta dell'eruzione sia preceduta da un'attività vulcanica minore. Quando questo si verifica, la fase meno intensa può servire come base per la valutazione delle misure di prevenzione da adottare.

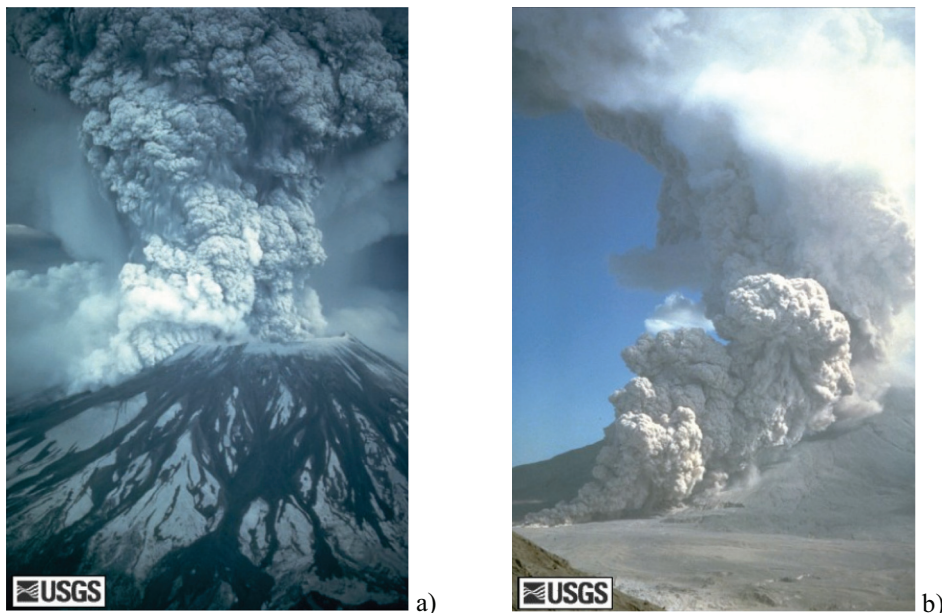


Figura 1. 9. Eruzione Mt. St. Helens (USA): a) colonna pliniana, 18 maggio 1980; b) flusso piroclastico, 7 agosto 1980. (USGS, 2010).

Eruzioni più recenti hanno fornito un numero di casi sufficienti a far comprendere quanto siano difficili le scelte nei momenti di emergenza. Ad esempio, le crisi sismiche e di deformazione del suolo che si sono avute nelle caldere di Long Valley e dei Campi Flegrei negli anni 70 e 80 non sono state seguite da alcuna eruzione, anche se i fenomeni osservati erano del tutto simili a quelli avvenuti prima di altre eruzioni nelle stesse aree. Tuttavia, precursori così evidenti non possono essere liquidati come falsi allarmi, senza considerare che il loro verificarsi è sintomo di uno stato di instabilità del sistema che può essere in condizioni prossime a quelle eruttive. Rabaul, che presentava molte analogie con i Campi Flegrei con precursori non seguiti da

attività, ha eruttato con un preavviso di sole 26 ore. Precursori a breve termine si sono avuti nel caso delle eruzioni del Redoubt nel 1989-90, con poco più di un giorno di preavviso o dell'Hekla nel 1991 con meno di mezz'ora di preavviso, segnalato da una improvvisa variazione di inclinazione senza apprezzabile sismicità.

Nel 1976-77 una crisi sismica e le successive esplosioni freatiche alla Soufrière della Guadalupe furono causa di allarme fra la popolazione e di disaccordo fra i vulcanologi incaricati di interpretare questi fenomeni. La stessa cosa era avvenuta durante la crisi ai Campi Flegrei nel 1972, dove la densità della popolazione, nonché il fatto che anche le zone limitrofe che potevano essere destinate ad accogliere le persone evacuate sono densamente abitate e collocate all'interno della caldera, crearono problemi pratici e di responsabilità molto gravi. Alla Soufrière della Guadalupe, la natura freatica delle esplosioni venne utilizzata per escludere la possibilità di fasi più intense. L'esperienza del St. Helens nel 1980 ha mostrato che le esplosioni freatiche possono essere un precursore dell'attività magmatica più violenta. Una successione analoga di fenomeni è avvenuta durante l'eruzione del Pinatubo nelle Filippine, mentre l'attività magmatica di El-Chichon, in Messico, non è stata preceduta da alcuna attività freatica.

Anche l'esperienza geologica, ricavata dagli studi sui depositi delle eruzioni esplosive, sembra fornire crescenti prove del verificarsi di fasi iniziali di tipo freatico. Infatti, alla base dei prodotti di numerose eruzioni pliniane, si ritrovano spesso i depositi di esplosioni freatiche. Bisogna poi tenere conto del fatto che non si è mai avuto un caso di sorveglianza completa di un vulcano che ritorna in attività. In molti casi le informazioni sono frammentarie o si riferiscono solo ad alcuni tipi di precursori. Gran parte dei sistemi di sorveglianza ben collaudati si trovano su vulcani che sono in stato di attività semipermanente, come il Kilauea alle Hawaii, l'Etna ed alcuni vulcani giapponesi. Al contrario, il progredire delle conoscenze e l'esperienza di questi anni fanno ritenere che le eruzioni più violente possono avvenire sui vulcani che si trovano da lungo tempo in stato di quiescenza e che a volte, proprio per questa ragione, sono scarsamente sorvegliati o del tutto ignorati.

1.3 IL RISCHIO VULCANICO DELLE AREE URBANIZZATE

1.3.1 Esposizione delle aree urbane agli effetti vulcanici

Oggi, circa 500 milioni di persone, concentrate in particolare ai tropici, sono soggette a rischio vulcanico (Figura 1.10). Grandi città si trovano solo ad alcune decine di chilometri da vulcani con un'elevata probabilità di eruzione nei prossimi cento anni. Inoltre, alti tassi di crescita della popolazione urbana dei paesi in via di sviluppo sono causa di grande preoccupazione perché molte città si trovano proprio sopra le cinture tettoniche, che ospitano la grande maggioranza dei vulcani più esplosiva al mondo (Chester et al., 2001).

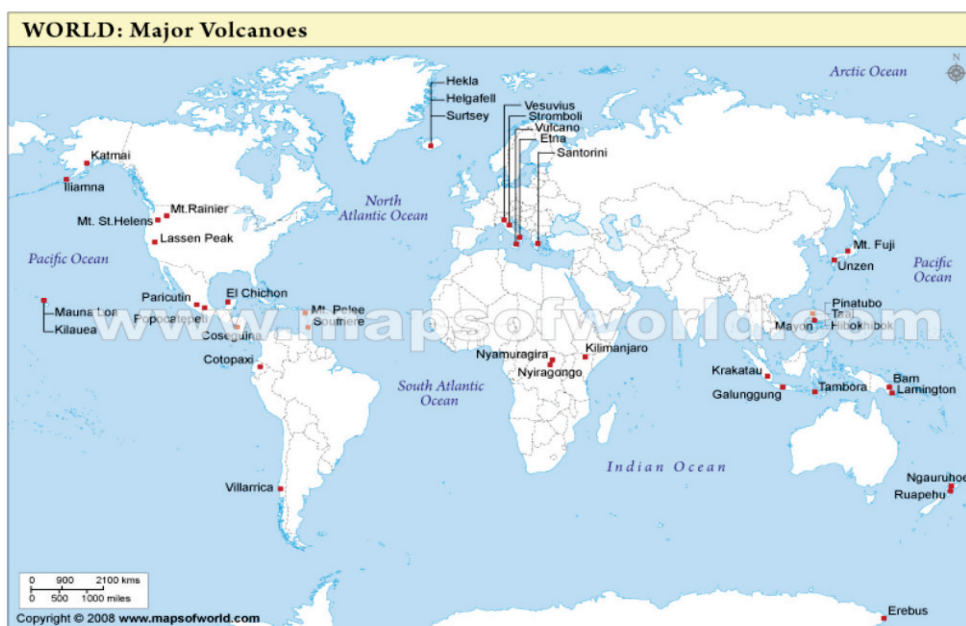


Figura 1. 10. Distribuzione geografica dei maggiori vulcani (www.mapsofworld.com)

La Figura 1.11 mostra l'ubicazione di alcune conurbazioni a rischio vulcanico, in funzione della distanza e della direzione rispetto al più vicino vulcano. Sono presenti megalopoli come Tokyo (25 milioni di persone) e Città del Messico (15,1 milioni di persone), nonché numerosi insediamenti urbani

minori. In particolare, si può osservare come, nella fascia dei 25km ricadano ben 5 conurbazioni:

- Managua, vulcani Masaya Nindiri e Apoyeque (Nicaragua, 990.000 persone);
- Quito, vulcano Guagua Pichincha (Ecuador, 1.400.000 persone),
- Arequipa, vulcano El Misti (Perù, 630.000 persone);
- Kagoshima, vulcano Sakura-jima (Giappone, 540.000 persone);
- Napoli, vulcano Vesuvio (Italia, 2.000.000 persone)

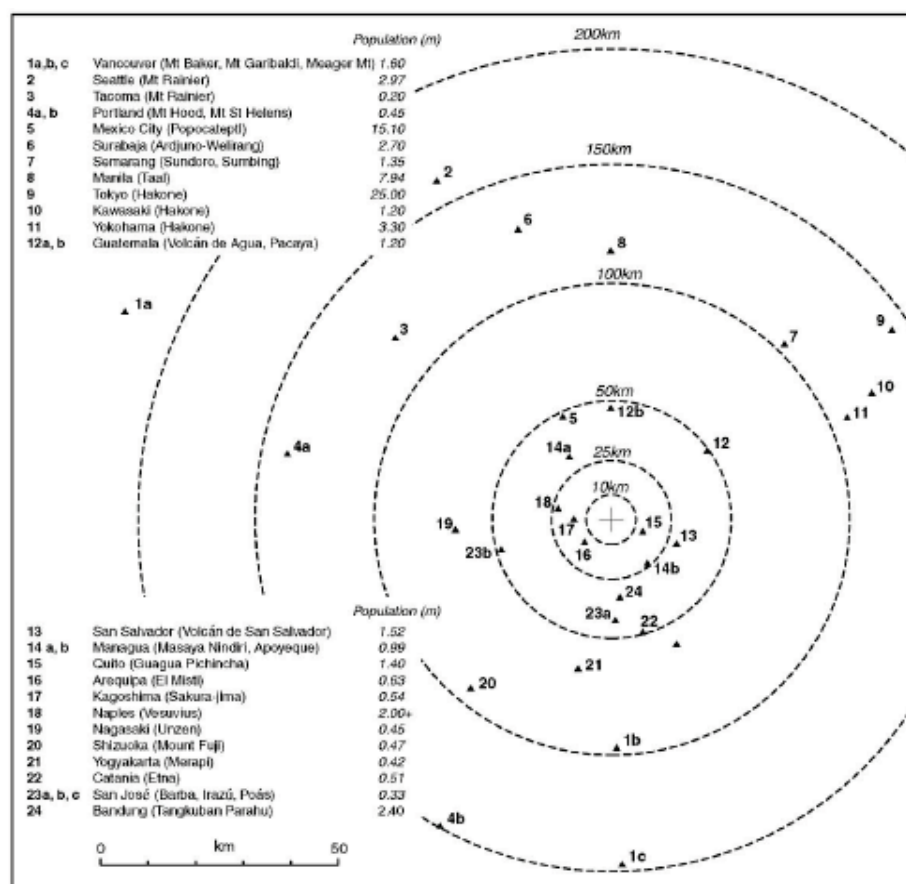


Figura 1. 11. Posizione degli agglomerati urbani maggiormente esposti al rischio vulcanico, sulla base della distanza e della direzione rispetto al più vicino vulcano (Chester et al., 2001).

Nella valutazione del rischio vulcanico, però, a contare non è solo la dimensione dell'insediamento urbano esposto, ma anche la sua posizione

strategica all'interno dell'economia di un paese o di una regione. Ad esempio, l'Islanda è un paese ricco in termini di Prodotto Interno Lordo (PIL) pro capite (25.300\$ US nel 2008), ma, ospitando una piccola popolazione (317.414), ha una modesta ricchezza nazionale. Dunque, l'eruzione del 1973 del vulcano Heimaey, pur interessando solo alcuni piccoli insediamenti della città di Vestmannaeyjar (5300 abitanti, meno del 2% del totale nazionale), produsse un costo per il Paese pari a circa il 2% del suo PIL, che si tradusse in un incremento delle tasse pari al 10% del reddito familiare. A titolo di paragone, l'eruzione del 1980 del Monte St. Helens costò all'economia degli Stati Uniti solo una piccola parte della sua ricchezza nazionale (0,03% del PIL), anche se il suo PIL pro capite non è di molto superiore a quello dell'Islanda (Chester et al., 2001). Addirittura, se l'eruzione islandese avesse riguardato una città più grande o la capitale Reykjavik (120.165 abitanti, circa il 38% della popolazione nazionale), gli effetti sull'economia dell'isola sarebbero stati devastanti.

Altre regioni esposte al rischio vulcanico, che presentano elevato sviluppo PIL pro capite, ma modesta ricchezza nazionale, sono le isole atlantiche Azzorre e Canarie; le isole della Grecia e, in misura minore, la Nuova Zelanda. In tutti questi casi, però, le conseguenze economiche possono essere mitigate dal fatto che queste aree geografiche fanno riferimento a contesti nazionali ed internazionali più ampi o perché relative ad una esposizione ridotta. Infatti, le Azzorre e le Canarie sono, rispettivamente, le regioni autonome del Portogallo e della Spagna, e l'aiuto sarebbe disponibile sia dai governi nazionali che dall'Unione Europea. La Grecia è anche essa membro dell'UE, mentre il problema vulcanico in Nuova Zelanda è confinato alle isole del nord.

Ovviamente, anche se le perdite potenziali sono gravi per i piccoli, ma ricchi paesi sviluppati, i rischi potenziali per piccoli paesi in via di sviluppo sono ancora più gravi. Ad esempio, gli effetti dell'eruzione del 1994 del vulcano Rabaul in Papua Nuova Guinea hanno interessato l'omonima città di Rabaul, un importante centro regionale e gli elevati costi di ricostruzione (6% del PIL) sono stati a carico della sola Rabaul, che al momento dell'eruzione, contava soltanto lo 0,4% della popolazione nazionale. In Papua Nuova Guinea, esistono numerosi altri insediamenti di dimensioni simili a Rabaul ed esposti ad uno dei 37 vulcani attivi durante l'Olocene (Blong e

McKee, 1995). Altri esempi di stati insulari poveri, con modeste popolazioni e con significativo rischio, comprendono molti paesi dei Caraibi e le isole Comore nell'Oceano Indiano.

Da considerare, inoltre, è la presenza di insediamenti a rischio di importanza strategica per alcuni paesi in via di sviluppo. Diversi esempi si collocano nelle Ande centrali, con la città peruviana di Camana (circa 20.000 abitanti, vulcani Coropuna e Sabancaya) e Arequipa (pop. 900.000 abitanti, vulcani Chachani ed El Misti).

L'impatto di una grande eruzione su un centro urbano di un paese in via di sviluppo rischia di avere gravi conseguenze sociali ed economiche a livello regionale, ma, probabilmente, con un'influenza minima su scala globale. Invece, un'importante eruzione in un paese sviluppato, oltre a devastare un'intera regione, potrebbe provocare gravi ripercussioni economiche globali, potrebbe essere questo il caso di Tokyo e delle numerose più piccole città giapponesi a rischio (Figura 1.11).

La Figura 1.12 indica le distanze teoriche (dal vulcano) entro le quali i fenomeni generatisi a seguito di un'eruzione possono influire negativamente sulle popolazioni. Queste distanze indicano come molte città, anche se non proprio vicine ad un vulcano, possono comunque essere soggette a rischio, per effetto, ad esempio, di tsunami o di perturbazioni meteorologiche vulcano-indotte.

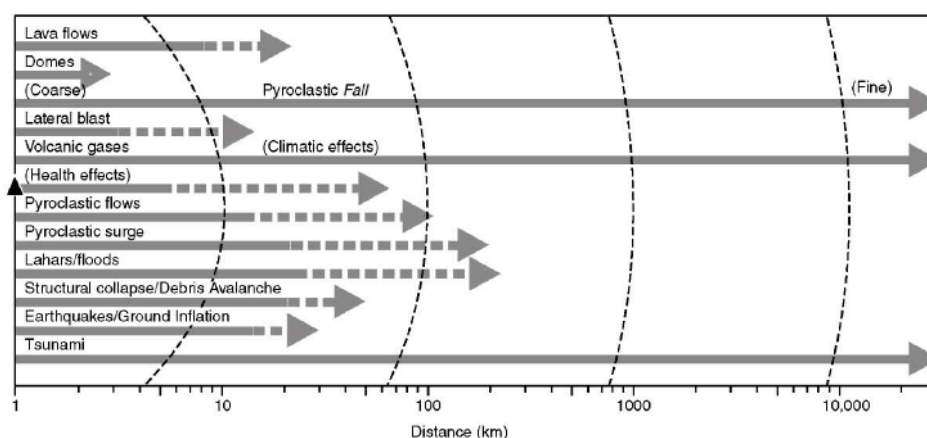


Figura 1. 12. Influenza della distanza sull'impatto distruttivo dei fenomeni associati alle eruzioni vulcaniche (Chester et al., 2001).

1.3.2 Il rischio vulcanico in Italia

Mediamente in Italia l'uso del territorio vicino ai vulcani, non ha tenuto conto della loro pericolosità, permettendo l'instaurarsi di situazioni di alto rischio.

In Italia esistono numerosi vulcani, sia estinti, sia quiescenti, sia attivi. Sebbene alcuni studiosi ritengono che non si possa mai considerare del tutto estinto un vulcano, la comunità scientifica internazionale ha adottato dei criteri per classificare i vulcani rispetto al loro stato di attività.

Vengono definiti vulcani *estinti* quelli la cui ultima eruzione risale ad oltre 10.000 anni fa. I principali vulcani italiani che rientrano in questa categoria sono: Monte Amiata, Vulsini, Cimini, Vico, Sabatini, Isole Pontine, Roccamonfina e Vulture.

Vengono definiti vulcani *quiescenti* i vulcani attivi che hanno dato eruzioni negli ultimi 10.000 anni, ma si trovano attualmente in una fase di riposo da tempo più o meno lungo. Secondo una definizione più rigorosa, si considerano quiescenti quei vulcani il cui tempo di riposo attuale è inferiore al più lungo periodo di riposo registrato in precedenza. In Italia si trovano in questa situazione: Colli Albani, Campi Flegrei, Ischia, Vesuvio, Salina, Lipari, Vulcano, Isola Ferdinandea e Pantelleria.

Vengono definiti vulcani *attivi* quelli che hanno dato eruzioni negli ultimi anni. In Italia, è il caso dell'Etna e dello Stromboli.

Di seguito, sono brevemente descritti i più importanti vulcani italiani attivi o quiescenti, le cui ultime eruzioni sono indicate in Tabella 1.5 e in Figura 1.13.

Tabella 1. 5. Ultima eruzione dei vulcani italiani attivi o quiescenti (Protezione Civile, 2010).

Vulcano	Ultima eruzione
Stromboli	Attività persistente
Etna	Attività persistente
Vesuvio	1944
Pantelleria	1891
Vulcano	1888-1890
Isola Ferdinandea	1831
Campi Flegrei	1538
Ischia	1302
Lipari	VI - VII secolo d.C



Figura 1. 13. Vulcani olocenici italiani (INGV, 2010)

Stromboli

Lo Stromboli è un vulcano in attività persistente, caratterizzato normalmente da esplosioni di moderata energia che ricorrono con una frequenza media di 10-20 minuti (Figura 1.14). L'energia relativamente contenuta delle esplosioni ordinarie e la persistenza dell'attività, non impediscono al vulcano di produrre

anche fenomeni eruttivi violenti e maremoti in grado di creare pericolo sia nella parte alta della montagna, sia, in misura minore, nelle zone abitate.

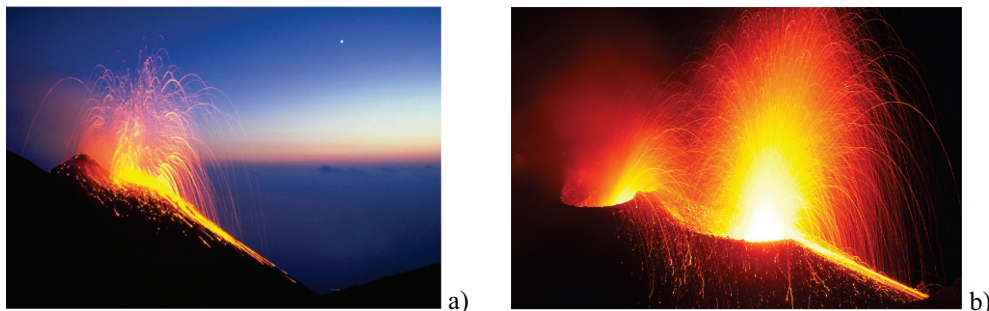


Figura 1. 14. Stromboli in eruzione: a) 27 giugno 2002, b) 11 maggio 2010.
(Alean et al., 2010)

Sull'isola si trovano infatti due centri abitati: Stromboli e Ginostra, situati rispettivamente lungo la costa nord-orientale e sud-occidentale.

Le esplosioni dell'attività ordinaria sono caratterizzate dal lancio di brandelli di lava, gas e ceneri con associata ricaduta di materiali pesanti fino ad una distanza di alcune centinaia di metri dalle bocche. I sentieri utilizzati per la salita al Pizzo Sopra la Fossa non sono quindi normalmente interessati dalla ricaduta di materiale. Saltuariamente l'attività è accompagnata da emissioni di lava che si riversano in forma di colata all'interno della Sciara del Fuoco. L'attività persistente e le effusioni laviche non costituiscono una fonte di pericolo diretta per i centri abitati e per gli escursionisti, sebbene l'attività effusiva possa introdurre degli elementi di instabilità del versante della Sciara del Fuoco e indurre processi franosi anche di grosse dimensioni con conseguente possibile formazione di maremoti.

I fenomeni in grado di recare pericolo al di fuori della Sciara del Fuoco sono le esplosioni parossistiche e i maremoti.

Le esplosioni parossistiche hanno un carattere improvviso e consistono in vere e proprie "cannonate", accompagnate da forti detonazioni, che lanciano bombe e blocchi a distanze di alcune chilometri dai crateri. La caduta di materiali pesanti interessa la parte alta della montagna ed occasionalmente i centri abitati. Oltre alla caduta di materiale pesante, altri pericoli connessi alle esplosioni parossistiche sono gli incendi innescati dalla ricaduta di materiali incandescenti sulla vegetazione e la formazione di valanghe di materiale caldo

che possono scendere nel Vallonazzo e nella Rina Grande/Schicciolo fino al mare.

I maremoti hanno generalmente intensità medie inferiori a quella del 30 dicembre 2002 ed avvengono, normalmente, in coincidenza con le esplosioni violente o con frane di grosse dimensioni. Il maremoto del 30 dicembre 2002 è stato innescato da una grande frana sottomarina poi propagatisi nella parte emersa. Il sistema di sorveglianza operante a Stromboli, centralizzato presso il Centro Operativo Avanzato, permette di riconoscere l'eventuale approssimarsi di tali fenomeni e di segnalare alla popolazione il possibile accadimento di eventi pericolosi.

Etna

Il tipo di attività dell'Etna è tale da rendere assolutamente improbabile la perdita di vite umane per gli effetti di un'eruzione.

Le eruzioni dell'Etna infatti sono caratterizzate prevalentemente da attività stromboliana, effusione di colate laviche ed emissioni di ceneri (Figura 1.15).

Le eruzioni possono avvenire dai crateri sommitali o da bocche che si possono aprire sui fianchi del vulcano, dando luogo in molti casi a coni avventizi come quelli che si ritrovano in gran quantità sulle pendici dell'Etna. L'attività stromboliana interessa generalmente un'area limitata intorno alla bocca eruttiva e normalmente non rappresenta un agente di rischio per i centri abitati.

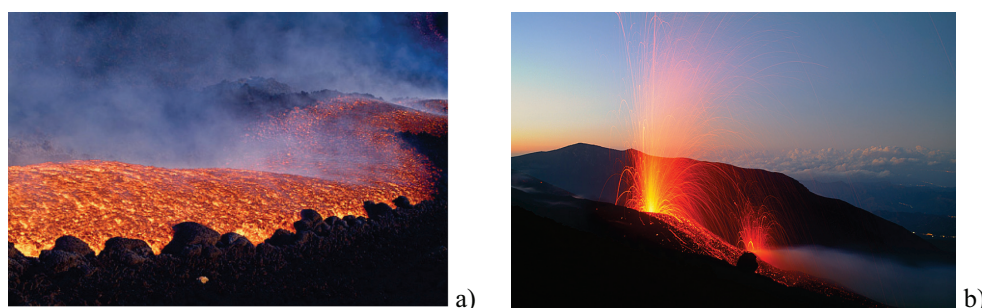


Figura 1. 15. . Etna in eruzione: a) 3 novembre 2006, b) 13 giugno 2008.
(Alean et al., 2010)

Le emissioni di cenere non costituiscono un fattore di rischio per la vita umana, sebbene possano causare notevoli disagi alla circolazione aerea e

stradale, danni economici e, in caso di esposizione prolungata senza opportune precauzioni, patologie all'apparato respiratorio.

Le colate laviche dell'Etna, a causa della loro viscosità e della conseguente bassa velocità con la quale si muovono, non sono tali da costituire un pericolo per l'incolumità delle persone. Nel caso in cui la fuoriuscita di lava avvenga da bocche poste ad alta quota, raramente i flussi raggiungono i centri abitati. Solamente nel caso di eruzioni di lunga durata, si può presentare tale eventualità. La lava in tali casi può anche formare dei tunnel e scorrere al loro interno, per poi fuoriuscire più a valle formando le cosiddette bocche effimere.

Nel caso in cui le colate giungano a minacciare un centro abitato, è comunque normalmente possibile attuare interventi di condizionamento del loro percorso, mediante tecniche differenti che possono consistere nella costruzione di barriere in terra, nella brecciatura degli argini dei canali per provocarne il deflusso in direzione diversa, nell'escavazione di canali artificiali, ecc., come già è stato fatto nel corso delle eruzioni del 1983, 1992, 2001 e 2002. E' bene sottolineare che, negli ultimi due casi, gli interventi erano volti a proteggere infrastrutture turistiche poste ad alta quota, ben lontane dai centri abitati.

Il rischio maggiore si ha quando l'effusione di lava avviene da bocche poste a bassa quota: in tal caso il tempo per effettuare interventi di condizionamento dei flussi sarebbe chiaramente ridotto e più probabilmente si dovrebbe ricorrere all'evacuazione della popolazione dalle aree minacciate, in conformità ai piani d'emergenza. Occorre comunque considerare che il sistema strumentale di monitoraggio di cui l'Etna è provvisto, è tra i più avanzati al mondo e consente di prevedere con buon anticipo l'inizio di un'eruzione. In particolare le eruzioni laterali, per le loro caratteristiche, vengono normalmente precedute da sequenze sismiche ben identificabili che permettono di individuare con buona precisione in che zona si aprirà la bocca eruttiva.

Vesuvio

A causa dell'elevata urbanizzazione sviluppatasi negli ultimi decenni alle sue falde, in cui vivono più di 550.000 persone, il Vesuvio è oggi uno dei vulcani a rischio più elevato al mondo.

Esso si trova attualmente in uno stato di quiescenza. Nel corso della sua storia, il Vesuvio è stato caratterizzato dall'alternanza tra periodi di attività eruttiva, con il condotto del vulcano aperto, e periodi di riposo, con il condotto ostruito.

I periodi a condotto ostruito sono caratterizzati da assenza di attività eruttiva e da accumulo di magma in una camera magmatica posta in profondità. Tali periodi sono stati sempre interrotti da eruzioni molto energetiche, alle quali hanno fatto poi seguito periodi di attività a condotto aperto con frequenti eruzioni effusive o esplosive di bassa energia.

L'eruzione del 1631 (Figura 1.16a) interruppe un periodo di riposo che durava da quasi cinque secoli. Dal 1631 al 1944 le eruzioni si sono susseguite intervallate da periodi di riposo di pochi anni.

Gli studiosi ritengono che l'eruzione del 1944 (Figura 1.16b) abbia segnato la fine di un periodo di attività a condotto aperto e l'inizio di un periodo di quiescenza a condotto ostruito. Dal 1944 ad oggi infatti, il Vesuvio ha dato solo attività fumarolica e sciami sismici di moderata energia, senza deformazioni del suolo o variazioni significative dei parametri fisici e chimici del sistema. Alla luce del comportamento passato si prevede che, qualora l'attività dovesse riprendere entro qualche decennio, la prossima eruzione sarebbe di tipo sub-pliniano, simile a quella del 1631 o del 472.

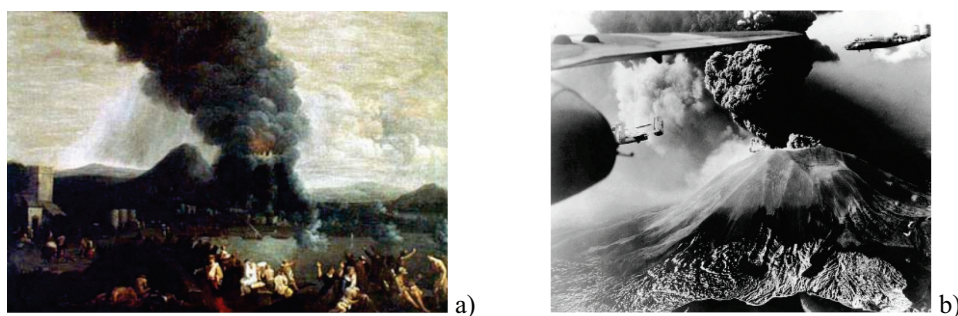


Figura 1. 16. Vesuvio in eruzione: a) 1631; b) 1944 (Osservatorio Vesuviano, 2010).

Lo scenario dei fenomeni attesi prevede in tal caso la formazione di una colonna eruttiva sostenuta alta diversi chilometri, la caduta di bombe vulcaniche e blocchi nell'immediato intorno del cratere e di particelle di dimensioni minori (ceneri e lapilli) anche a diverse decine di chilometri di

distanza, nonché la formazione di flussi piroclastici che scorrerebbero lungo le pendici del vulcano per alcuni chilometri.

Sono state così individuate le zone potenzialmente soggette ai diversi fenomeni previsti per le quali è stato elaborato un piano nazionale d'emergenza che prevede azioni differenziate.

Campi Flegrei

I Campi Flegrei sono una caldera vulcanica in stato di quiescenza e, come il Vesuvio, presentano un rischio molto elevato per la presenza di numerosi centri abitati nell'area e per la loro immediata vicinanza alla città di Napoli.

Una caldera è una vasta depressione, per lo più circolare, che si forma in aree vulcaniche a seguito dell'espulsione di grandi quantità di magma da una camera magmatica superficiale; lo svuotamento della camera magmatica causa il collasso delle rocce soprastanti per mancanza di sostegno e dà origine alla depressione. Le caldere possono raggiungere dimensioni anche di alcune decine di chilometri.

Le due maggiori eruzioni dei Campi Flegrei risalgono a 39mila e 15mila anni fa circa e sono note per aver dato luogo alla deposizione di coltri di prodotti, denominati rispettivamente Ignimbrite Campana e Tufo Giallo Napoletano, che si rinvengono tuttora in una vasta zona che si spinge oltre le pendici degli Appennini.

Negli ultimi 15mila anni ai Campi Flegrei si sono susseguiti tre periodi di intensa attività, caratterizzati da un'eruzione ogni poche decine di anni, intervallati fra loro da periodi di riposo durati invece secoli o anche millenni.

L'ultimo di questi periodi di attività, durante il quale si sono creati molti degli edifici vulcanici visibili nell'area intracalderica, si è concluso 3800 anni fa.

Il 29 settembre 1538 tuttavia, si è verificata una nuova eruzione che, pur essendo fra le minori dell'intera storia eruttiva dei Campi Flegrei, ha interrotto un periodo di quiescenza di circa 3000 anni e, nel giro di pochi giorni, ha dato origine al cono di Monte Nuovo, alto circa 130m. Da tale evento a oggi, i Campi Flegrei non hanno dato più alcuna attività eruttiva (Figura 1.17).

La definizione della pericolosità ai Campi Flegrei incontra problemi notevoli rispetto ad altri vulcani. Per la definizione di uno scenario eruttivo è infatti necessario determinare il tipo di eruzione più probabile, con le relative

possibili fenomenologie attese, nonché la probabilità di apertura di bocche eruttive in zone diverse, che ovviamente condiziona la potenziale distribuzione dei prodotti sul territorio. Nei Campi Flegrei infatti, a differenza di quanto avviene nei vulcani con apparato centrale, l'area di possibile apertura di bocche eruttive è molto ampia. Si prevede comunque che una futura eruzione ai Campi Flegrei possa generare diverse fenomenologie, riassumibili essenzialmente nel lancio di bombe e blocchi di grosse dimensioni nell'immediato intorno del centro eruttivo, nello scorrimento di flussi piroclastici nel raggio di alcuni chilometri, nella ricaduta di ceneri e lapilli a distanza anche di molti chilometri. Per quanto concerne quest'ultimo fenomeno occorre considerare che, a differenza del Vesuvio la città di Napoli si trova sottovento rispetto alla direzione dei venti dominanti e sarebbe pertanto coinvolta.

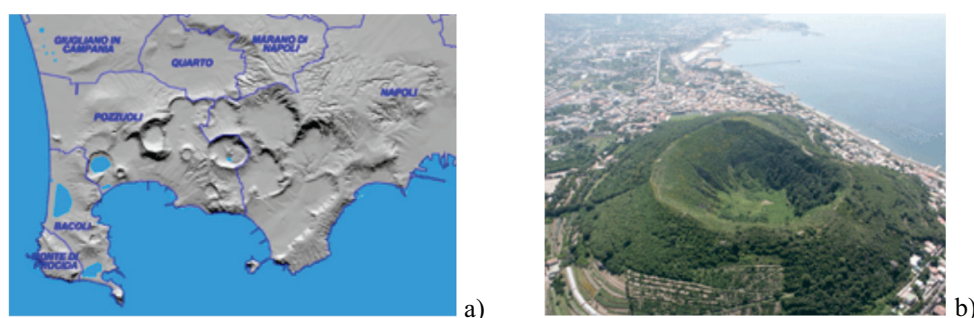


Figura 1. 17. Campi Flegrei: a) la zona con i limiti amministrativi comunali; b) il cratere di Monte Nuovo e la città di Pozzuoli sullo sfondo (Protezione Civile, 2010).

Vulcano

L'isola di Vulcano ha un'estensione di circa 23 km² ed un'altezza massima di 500m sul livello del mare. Con una lunghezza di 5.5-6 km in direzione Nord-Sud e di 4.5 km circa in direzione Est-Ovest, ha una forma allungata dovuta all'unione di strutture vulcaniche costruite in epoche successive, la più giovane delle quali è quella di Vulcanello.

Rappresenta la parte emersa di un apparato vulcanico la cui base parte da circa 900-1.000m sotto il livello del mare e la cui storia eruttiva subaerea iniziò circa 125 mila anni fa (sulla base dei dati derivanti da rocce ad oggi emerse).

A differenza di Stromboli, dove le eruzioni sono continue e di moderata intensità, l'attività vulcanica del cratere di La Fossa ha un carattere episodico con crisi eruttive, anche di forte intensità, che si alternano a lunghi periodi di riposo (Figura 1.18). L'ultima eruzione, iniziata nell'agosto del 1888 e terminata nel marzo del 1890, ha dato il nome ad un particolare tipo di attività vulcanica esplosiva chiamata "attività vulcaniana".

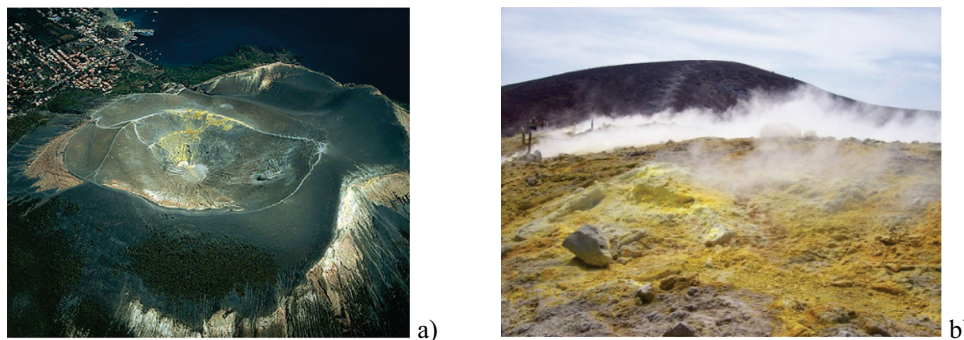


Figura 1. 18. Vulcano: a) 3 novembre 2002; b) 12 maggio 2008. (Protezione Civile, 2010).

Ischia

Ischia è un'isola formata da numerosi vulcani, che si erge per circa 900m dal fondo del mare, nella parte nord-occidentale del Golfo di Napoli. Si sono verificate eruzioni fino al 1302, anno dell'ultimo evento: l'accumulo dei prodotti vulcanici ha così costruito un'isola ampia circa 46km² che raggiunge un'altezza massima sul livello del mare di 787m, in corrispondenza del Monte Epomeo.

La maggior parte dell'isola è costituita da depositi di eruzioni sia effusive che esplosive, che hanno costruito edifici vulcanici, alcuni dei quali ancora ben visibili nel settore sud-orientale dell'isola, altri del tutto smantellati o sepolti. Molto diffusi sono anche i depositi di frane che derivano dall'accumulo di materiale vulcanico preesistente.

L'evento che ha segnato la storia geologica dell'isola è l'eruzione del Tufo Verde dell'Epomeo. L'eruzione, fortemente esplosiva, si è verificata circa 55.000 anni fa, ed è responsabile della formazione di una caldera, che occupava la zona in cui si trova oggi la parte centrale dell'isola. La formazione di flussi piroclastici ha parzialmente riempito la depressione

calderica, che nel frattempo era stata invasa dal mare, ed ha in parte ricoperto le zone allora emerse.

Dopo l'eruzione del Tufo Verde, l'attività vulcanica è proseguita con una serie di eruzioni esplosive, fino a circa 33.000 anni fa. Circa 10.000 anni fa, dopo un periodo di stasi relativamente lungo, l'attività è proseguita anche in epoca storica con una serie di eruzioni, di cui l'ultima avvenuta nel 1302 d.C., determinando la formazione della colata lavica dell'Arso.



a)



b)

Figura 1. 19. Ischia: a) Monte Epomeo; b) Fungo di Lacco Ameno, blocco di Tufo Verde. (Protezione Civile, 2010).

Capitolo 2

Il rischio vulcanico dell'area napoletana

2.1. I TRE COMPLESSI VULCANICI NAPOLETANI

2.1.1. Somma- Vesuvio

L'area vulcanica partenopea comprende tre vulcani attivi e pericolosi, Somma-Vesuvio, Campi Flegrei e Ischia, ed è abitata da circa tre milioni di persone, con una elevata densità di popolazione (Figura 2.1).

La storia vulcanica e deformativa e lo stato attuale di questi vulcani consentono di prevedere che essi possono dare ancora eruzioni e che queste potrebbero essere di tipo esplosivo. La pericolosità dei tre vulcani, l'alto valore esposto e la sua elevata vulnerabilità fanno dell'area napoletana una delle zone a più alto rischio vulcanico del mondo.

Il Vesuvio, il più pericoloso tra i vulcani attivi italiani, è noto nel mondo soprattutto per l'eruzione del 79 d.C., che interruppe un periodo di quiescenza durato sette secoli e distrusse in due giorni le città di Pompei, Ercolano, Oplonti e Stabia.

Il Somma-Vesuvio è uno strato-vulcano di medie dimensioni che raggiunge

Un'altezza massima di 1.281m s.l.m.. E' costituito dal più vecchio vulcano del Monte Somma, la cui attività terminò con lo sprofondamento di una caldera sommitale, e dal più recente vulcano del Vesuvio, cresciuto all'interno di quella caldera. La morfologia del Monte Somma è caratterizzata da un

versante meridionale molto ripido, e da uno settentrionale meno acclive e solcato da numerose e profonde incisioni vallive a distribuzione radiale.



Figura 2. 1. Immagine da satellite dell'area napoletano-flegrea in cui è evidenziata l'urbanizzazione (Orsi et al., 2002).

Il Vesuvio ha una tipica forma a cono con un cratere sommitale di circa 500 m di diametro e profondo circa 300m (Figura 2.2). Il cratere del Vesuvio è situato a circa 15km dal centro della città di Napoli, verso E-SE. Le rocce vulcaniche più antiche dell'area vesuviana sono state incontrate in un pozzo perforato sul versante meridionale del vulcano, a una profondità di 1125m al di sotto del livello del mare. Esse hanno un'età di circa 300.000 anni e segnano probabilmente l'inizio dell'attività vulcanica nell'area.

Il vulcano del Monte Somma si è formato per accumulo di depositi di eruzioni prevalentemente effusive e subordinatamente esplosive di bassa energia. Questo accrescimento, iniziato successivamente alla messa in posto del deposito dell'eruzione flegrea dell'Ignimbrite Campana, avvenuta circa 37.000 anni fa, è durato fino a circa 18.000 anni fa, quando in seguito a un'eruzione pliniana si formò una caldera che è stata in seguito varie volte modificata da successivi collassi (Figura 2.3).



Figura 2. 2. Vista del Vesuvio da sud (Orsi et al., 2002).

Prima del 79 d.C. l'attività del Vesuvio fu caratterizzata da quattro eruzioni pliniane, separate da periodi di riposo della durata di alcune migliaia di anni e da una serie di eruzioni sub-pliniane precedute da periodi di riposo lunghi centinaia di anni. Queste eruzioni esplosive di elevata energia sono caratterizzate da emissione parossistica di grandi volumi di magma frammentato, seguita dalla caduta di particelle vulcaniche e dallo scorrimento di flussi piroclastici, surges piroclastici e colate di fango (durante l'eruzione del 79 d.C. furono emessi circa 0.75km^3 di magma). Nella caldera formatasi durante l'eruzione del 79 d.C. è cresciuto il vulcano più giovane, il Vesuvio.

Per circa mille anni dopo il 79 d.C. il Vesuvio continuò, con frequenti eruzioni, a riversare i suoi prodotti sulle aree circostanti. Seguì poi un periodo di quiescenza che durò circa cinque secoli, dal 1139 al 1631.

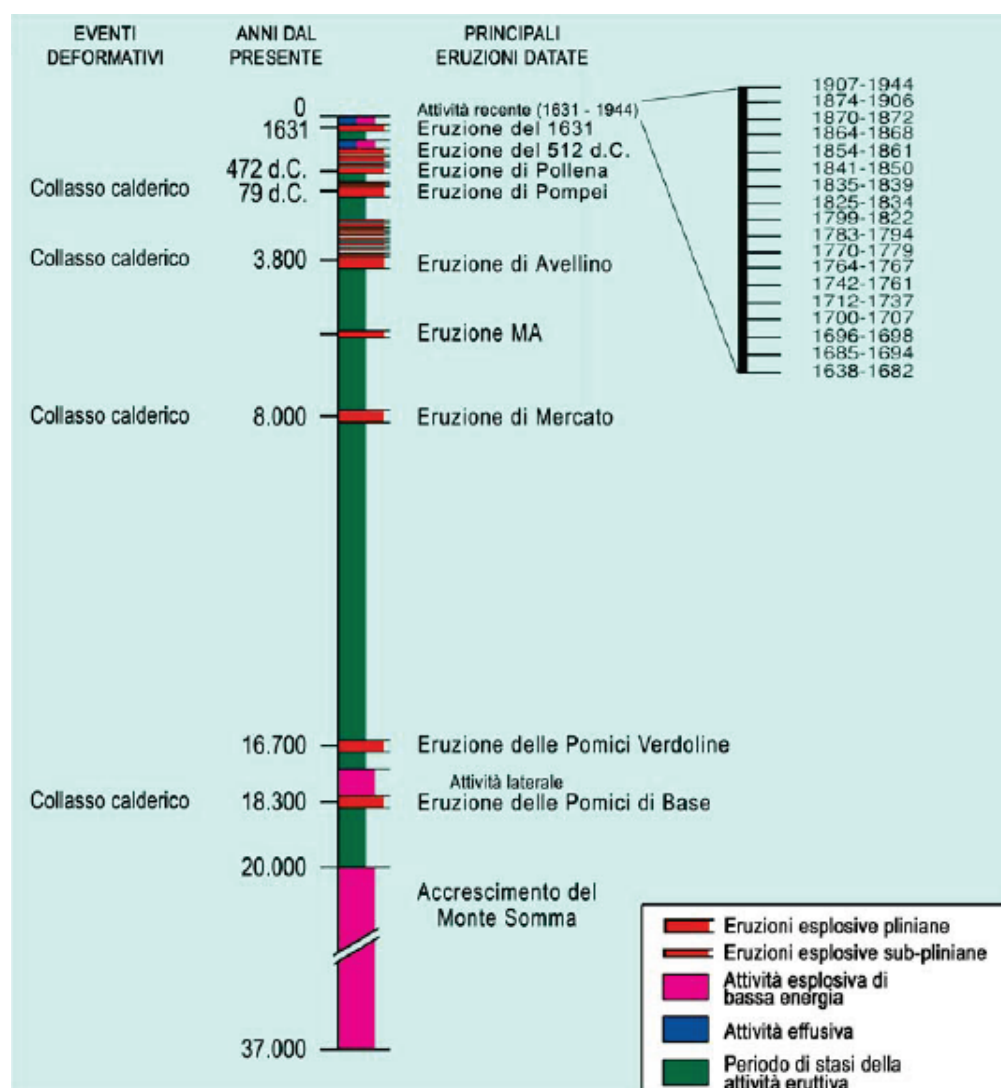


Figura 2. 3. Cronogramma dell'attività del Somma-Vesuvio (Orsi et al., 2002).

Le generazioni che si avvicendarono ai piedi del vulcano cominciarono a dimenticare la reale natura della montagna, che nel frattempo si ricoprì di vegetazione, e assunse nuovamente quell'aspetto idilliaco che aveva avuto prima dell'eruzione dell'anno 79 d.C. Il nuovo terribile risveglio, in una tragica notte del dicembre del 1631, seminò ancora distruzione e morte. A partire da questa eruzione, ha avuto inizio un periodo di attività eruttiva durante il quale

si sono alternate fasi caratterizzate da prevalente attività stromboliana, brevi periodi di riposo che non sono mai stati superiori a sette anni e violente eruzioni miste (effusive ed esplosive).

L'attività del vulcano richiamò scienziati e intellettuali da tutta Europa, che hanno lasciato nelle loro memorie di viaggio ricche e particolareggiate descrizioni del Vesuvio e della sua varie fenomenologie eruttive. Questo periodo si concluse con l'ultima eruzione, che iniziò il 18 marzo 1944 e terminò nei primi giorni di aprile dello stesso anno.

Dal 1944 ad oggi il vulcano ha dato solamente modesti segni di vita quali attività fumarolica, prevalentemente all'interno del cratere, e terremoti di bassa energia con ipocentri fino a 6km di profondità. Non ci sono state deformazioni del suolo né si è registrata alcuna variazione di parametri fisici e chimici che possa indicare una riattivazione della dinamica del sistema. I risultati di indagini geofisiche sulla struttura profonda del vulcano indicano che non ci sono accumuli di significativi volumi di magma nei primi 10km di crosta.

Il comportamento passato e lo stato attuale del Vesuvio suggeriscono che il vulcano può riprendere la sua attività eruttiva, e che se un'eruzione avverrà nelle prossime decine di anni, potrà essere di tipo esplosivo. Pertanto il Vesuvio è un vulcano altamente pericoloso.

2.1.2. Campi Flegrei

Nella storia della cultura europea i Campi Flegrei rappresentano il mito di Roma, celebrato nel libro VI dell'Eneide, quando Virgilio fa sbarcare proprio qui l'eroe capostipite della famiglia dell'imperatore Augusto. Era il mito, non la storia che cercavano sulle sponde flegree, i viaggiatori di ogni tempo come Francesco Petrarca, che del suo viaggio nel territorio d'Averno, di Cuma e Miseno, nel 1343 scrive: “..ho visto tutti i luoghi di Virgilio”.

Il nome Campi Flegrei cioè “Campi Ardenti” (dal greco $\phi\lambda\epsilon\gamma\omega$ “ardo”) fu dato a questa mitica regione, dove Ercole sconfisse i Giganti, “..da un monte che un tempo gettava fiamme” (Diodoro Siculo, I sec. a.C.). I Campi Flegrei sono una caldera risorgente complessa formatasi attraverso due principali episodi di sprofondamento avvenuti rispettivamente durante l'eruzione dell'Ignimbrite Campana, circa 37.000 anni fa, e l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano, circa 12.000 anni fa (Figura 2.4).

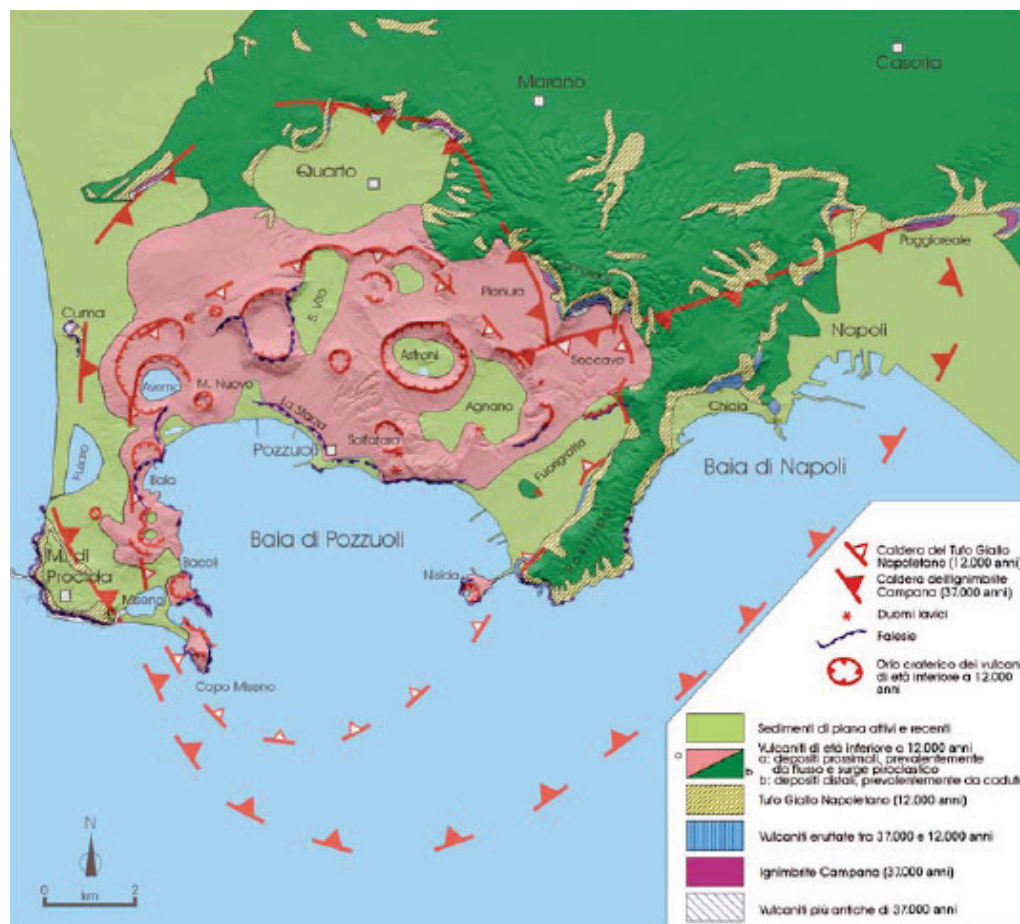


Figura 2. 4. Carta geologica schematica dell'area napoletano-flegrea (Orsi et al., 2002).

L'età di inizio del vulcanismo nell'area flegrea non è nota. I prodotti vulcanici più antichi in affioramento hanno 60.000 anni (Figura 2.5). La maggior parte delle rocce più vecchie dell'Ignimbrite Campania è stata prodotta da eruzioni esplosive e solamente poche eruzioni effusive. Solo alcuni degli edifici vulcanici che si formarono in questo periodo più antico sono oggi esposti. Sulla base delle caratteristiche di alcuni depositi diversi di alcuni si può ipotizzare che l'area vulcanica attiva doveva essere più ampia dell'attuale caldera. Ad esempio Monte Grillo a Miliscola è il relitto di un cono piroclastico, e centri

di eruzioni effusive verosimilmente si trovavano nelle vicinanze dei duomi lavici di Punta Marmolite e di Cuma.

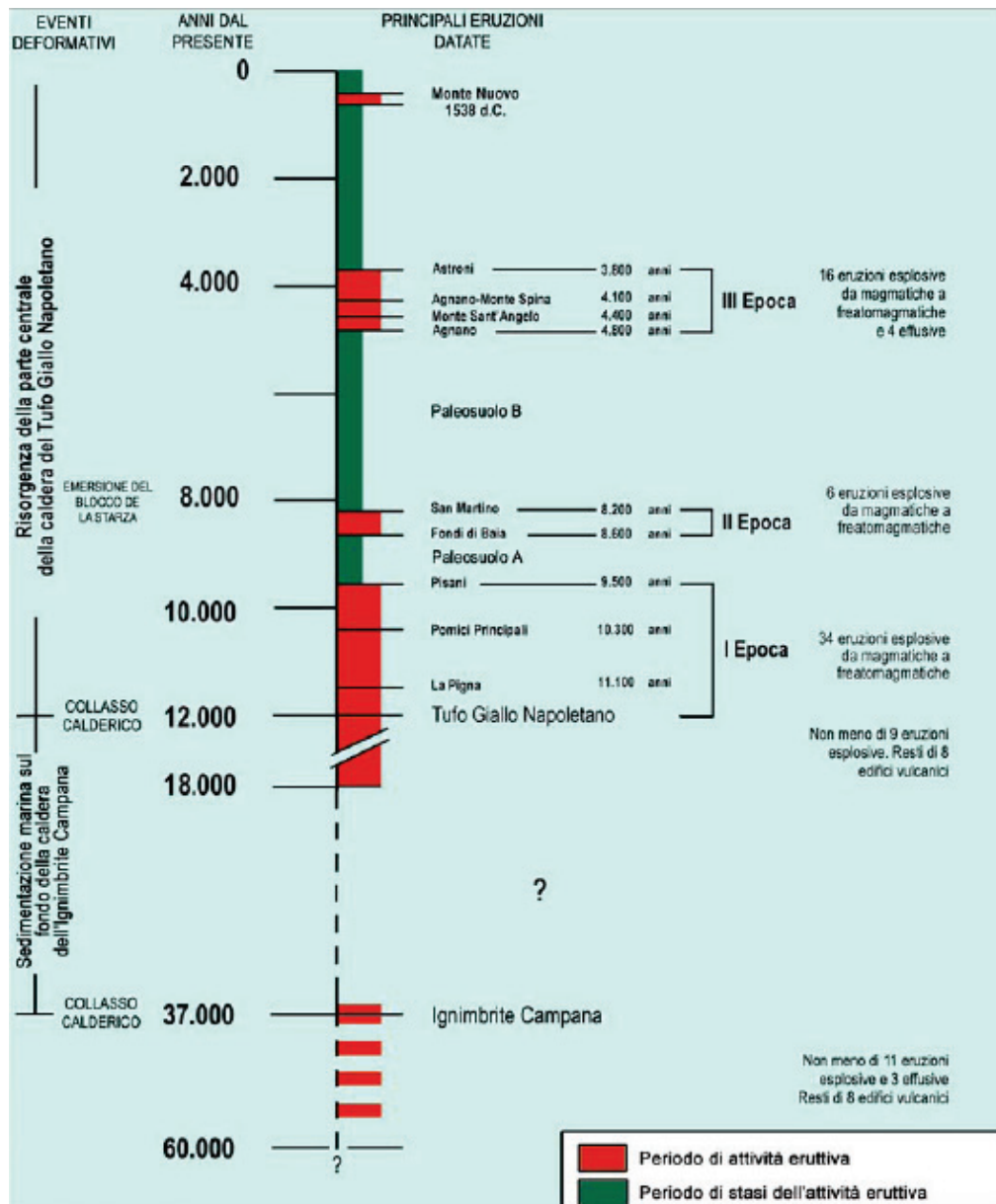


Figura 2. 5. Cronogramma dell'attività dei Campi Flegrei (Orsi et al., 2002).

L'eruzione che formò il tufo noto come Ignimbrite Campana è stata la più grossa eruzione esplosiva avvenuta nell'area mediterranea negli ultimi 200.000 anni. Durante questa eruzione furono emessi 150km^3 di magma, formando il tufo che ricoprì, con spessori significativi, un'area di circa 30.000km^2 . L'eruzione iniziò con la formazione di una colonna pliniana che raggiunse un'altezza di 45km. Dalla parte più alta di questa colonna, caddero al suolo frammenti che formarono un deposito piroclastico da caduta. Ceneri di quest'eruzione sono state ritrovate nei sedimenti sul fondo del Mar Mediterraneo e nei ghiacci della Groenlandia. Successivamente iniziò il collasso della caldera lungo faglie, attraverso le quali furono emessi flussi piroclastici.

Alcuni di questi erano talmente espansi e poco densi che superarono rilievi montuosi di oltre 1.000m di altezza e, oltrepassando la baia di Napoli, superarono la Penisola Sorrentina. Alla fine di questa eruzione, la depressione calderica interessava un'area di circa 230km^2 e lo sprofondamento era dell'ordine di circa 700m. L'Ignimbrite Campana è stata largamente utilizzata come materiale da costruzione fin dai primi insediamenti greci dell'VIII sec. a. C.

Tra l'eruzione dell'Ignimbrite Campana e quella del Tufo Giallo Napoletano, il vulcanismo della caldera è stato caratterizzato prevalentemente da eruzioni esplosive per lo più freato-magmatiche, che hanno prodotto estese coltri di depositi piroclastici e con di tufo, e, in misura minore, da eruzioni effusive che hanno formato lave e duomi lavici.

L'eruzione che 12.000 anni fa produsse il deposito piroclastico noto, per il suo tipico colore, come Tufo Giallo Napoletano, è la seconda per importanza nell'area napoletana.

Essa, caratterizzata dall'alternarsi di esplosioni magmatiche e da un collasso calderico, emise circa 50km^3 di magma. Il Tufo Giallo Napoletano coprì un'area superficiale di circa 1.000km^2 e si rinviene nell'area napoletano-flegrea, nella Piana Campana fino ai rilievi dell'Appennino, e nel Golfo di Napoli. Il suo spessore massimo è di circa 100m nelle zone più vicine al centro eruttivo. Anche il Tufo Giallo Napoletano, come l'Ignimbrite Campana, è stato molto utilizzato come materiale da costruzione. Dopo l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano e il relativo collasso calderico, gran parte dell'attuale settore meridionale dei Campi Flegrei, a sud delle piane di

Soccavo e Pianura, si trovò al di sotto del livello del mare. Rimasero emerse solo le zone più rilevate, come il promontorio di Cuma e il Monte di Procida che, in questa fase, dovevano essere delle piccole isole. Questa ingressione del mare è testimoniata dalla presenza di sedimenti marini intercalati ai depositi piroclastici. Il vulcanismo più recente dell'eruzione del Tufo Giallo Napoletano è stato concentrato in tre epoche di intensa attività avvenuta tra 12.000 e 9.500; 8.600 e 8.200; 4.800 e 3.800 anni fa. Alle epoche di attività si sono alternati periodi di quiescenza. Le eruzioni, prevalentemente esplosive di energia medio- bassa, si sono succedute, in ciascuna epoca di attività, ad intervalli medi dell'ordine delle decine di anni. Le uniche due grosse eruzioni si sono avute 10.300 anni fa (eruzione delle Pomici Principali) e 4.100 anni fa (eruzione di Agnano-Monte Spina).

L'ultima eruzione nei Campi Flegrei è avvenuta nel settembre del 1538 d.C., dopo un periodo di quiescenza durato circa 3.000 anni, e ha determinato la formazione del cono del Monte Nuovo. Questa eruzione è una delle più piccole verificatesi nei Campi Flegrei, ed è durata solo una settimana, con l'emissione di $0,025\text{km}^3$ di magma. Essa produsse essenzialmente surges e flussi piroclastici, distribuiti in un raggio di circa 1km intorno al centro di emissione. L'eruzione fu preceduta da deformazioni del suolo molto vistose e da attività sismica avvertita fino a Napoli.

Il fondo della caldera del Tufo Giallo Napoletano è stato deformato negli ultimi 10.000 anni da un fenomeno di risorgenza, tuttora in corso, che ha condizionato la distribuzione areale dei centri eruttivi. Il sollevamento complessivo della parte centrale della caldera, è stato di circa 90m. Esso ha determinato l'emersione del terrazzo marino de La Starza, che, a partire dal collasso della caldera del Tufo Giallo Napoletano e fino a circa 4.500 anni fa aveva costituito, tranne che per un breve periodo di emersione, il fondo del mare. Le ultime manifestazioni di questo sollevamento sono i recenti eventi bradisismici del 1969-72, 1982-84, 1989, 1994, 1997 e 2000.

La posizione dei centri eruttivi e l'alternarsi di periodi di attività e di quiescenza sono strettamente correlati al collasso della caldera del Tufo Giallo Napoletano e alla dinamica della risorgenza della sua parte centrale. Oggi la caldera, oltre ad essere interessata da deformazioni del suolo, è sede di un'intensa e continua attività fumarolica.

I risultati di studi effettuati usando diverse metodologie, suggeriscono che la camera magmatica è complessa e probabilmente ubicata a bassa profondità e di notevoli dimensioni.

Il comportamento passato e lo stato attuale della caldera dei Campi Flegrei indicano che essa è un vulcano ancora attivo e potrà dare eruzioni in futuro. Se un'eruzione avverrà nelle prossime decine di anni, potrà essere di tipo esplosivo. Pertanto la caldera dei Campi Flegrei è altamente pericolosa.

2.1.3. Ischia

L'isola di Ischia fu la prima colonia, nell'Italia meridionale, fondata dai Greci intorno al 770 a.C. con il nome di *Pithecura*. La sua origine vulcanica era ben nota fin dall'antichità e Plinio il Vecchio, in riferimento ad isole sorte dal mare per eruzioni vulcaniche, così scrive: “riferisco che in tal modo sia sorta anche Pithecura e che in seguito in quest'isola il Monte Epomeo, mentre dal medesimo prorompeva fiamma, sia stato ridotto in pianura, e che nella stessa isola una cittadina sia stata inghiottita dalla profondità e che con un altro movimento della terra sia emerso un lago e con un altro ancora, si sia formata l'isola di Procida” (Plinio il Vecchio, *Naturalis Historia*, II, 203).

L'isola d'Ischia è un campo vulcanico che, probabilmente, nel passato era molto più esteso. Le rocce vulcaniche presenti sull'isola sono il prodotto tanto di eruzioni effusive, che hanno formato colate e duomi di lava, quanto di eruzioni esplosive, che hanno generato estese coltri depositi piroclastici. L'età di inizio dell'attività vulcanica sull'isola non è nota con precisione. Le rocce più antiche datate hanno un'età di 150.000 anni (Figura 2.6) e appartengono a un antico complesso vulcanico, i cui resti di si rinvengono nel settore sud-orientale dell'isola ricoperti dai prodotti di eruzioni più recenti. Tra 150.000 e 74.000 anni fa si formarono piccoli duomi lavici Campagnano, Monte Vezzi, Monte Barano, Punta della Signora, Sant'Angelo, Punta Chiarito, Capo Negro, Punta Imperatore, Monte Vico e l'isolotto su cui è costruito il Castello Aragonese, situati lungo le coste dell'attuale isola. A questo periodo di attività fece seguito un periodo di quiescenza, che si interruppe circa 55.000 anni fa con l'eruzione del Tufo Verde del Monte Epomeo. Questa eruzione fu accompagnata dal collasso calderico della parte centrale dell'isola, oggi occupata dal Monte Epomeo, che fu sommersa dal mare. Il tufo si depositò in

mare sul fondo della caldera e ricoprì le zone allora emerse che oggi formano gli alti morfologici dell'isola.

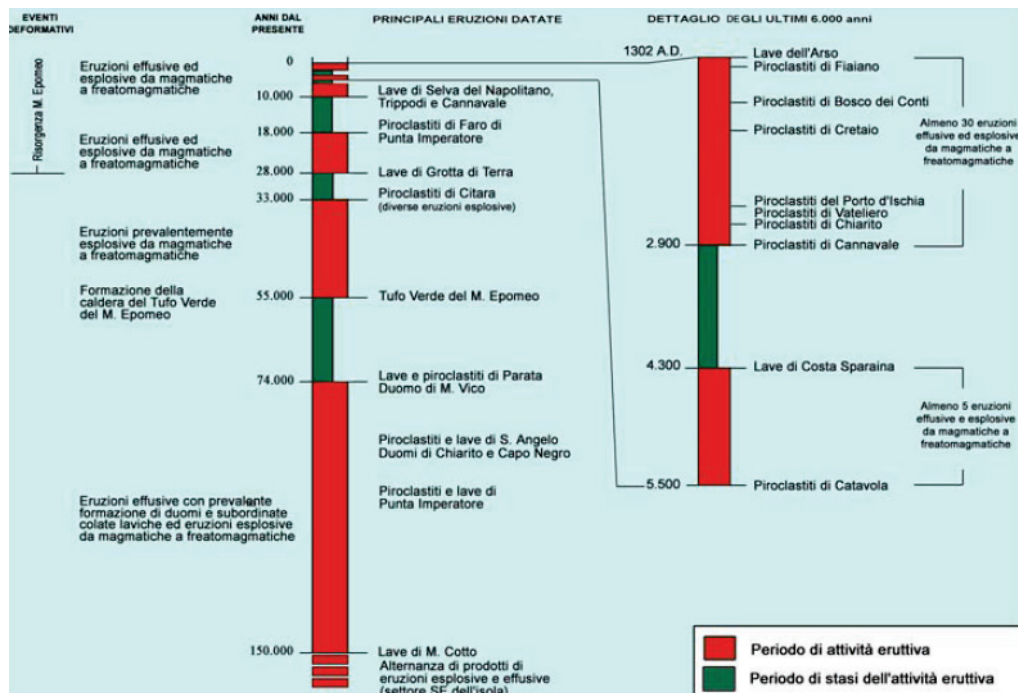


Figura 2. 6. Cronogramma dell'attività dei Campi Flegrei (Orsi et al., 2002).

Dopo l'eruzione del Tufo Verde del Monte Epomeo, il vulcanismo è proseguito con una serie di eruzioni esplosive fino a circa 33.000 anni fa. Le rocce prodotte da queste eruzioni sono esposte lungo le scarpate tra Sant'Angelo e Punta Imperatore, a Citara e Monte Vico.

L'eruzione di Grotta di Terra, avvenuta circa 28.000 anni fa lungo la costa sudorientale dell'isola, segnò la ripresa dell'attività eruttiva dopo una pausa durata alcune migliaia di anni. Questa attività continuò sporadicamente fino a 18.000 anni fa, con eruzioni effusive ed esplosive (magmatiche e idromagmatiche), che hanno prodotto colate laviche, coni di tufo e depositi piroclastici. Le rocce di questo periodo sono ben esposte alla Grotta del Mavone, a Monte di Vezzi, nell'area di Sant'Anna e Carta Romana, a Monte Cotto e tra Punta Imperatore e il promontorio di Sant'Angelo.

Dopo un periodo di quiescenza di circa 8.000 anni, l'attività vulcanica riprese 10.000 anni fa, producendo 46 diverse eruzioni, concentrate principalmente tra 2.900 anni fa e il 1302 d.C., anno dell'ultima eruzione. I centri eruttivi, localizzati prevalentemente nel settore orientale dell'isola, generarono eruzioni effusive ed esplosive, che produssero colate di lava e depositi piroclastici da caduta e da flusso. Gli edifici vulcanici sono duomi lavici, coni di pomici, coni di scorie e coni di tufo.

La parte centrale dell'isola, dominata dal Monte Epomeo, risulta dal sollevamento del fondo della caldera del Tufo Verde del Monte Epomeo, iniziato circa 33.000 anni fa. Le modalità di sollevamento e deformazione del blocco del Monte Epomeo hanno determinato la concentrazione dei centri eruttivi negli ultimi 10.000 anni quasi esclusivamente nel settore orientale dell'isola margine orientale (Figura 2.7).

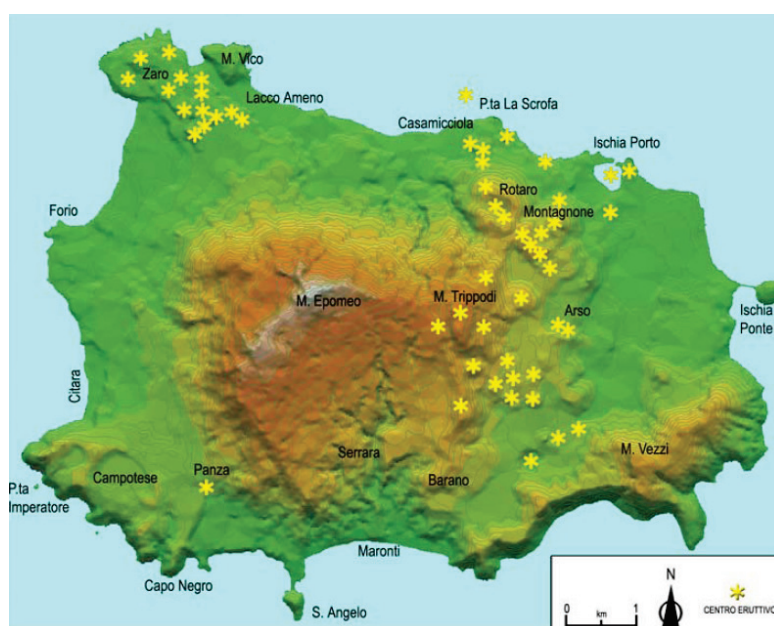


Figura 2. 7. Distribuzione dei centri eruttivi attivi negli ultimi 10.000 anni all'isola di Ischia (Orsi et al., 2002).

La storia geologica di Ischia evidenzia che l'attività eruttiva può riprendere dopo periodi di quiescenza più o meno lunghi. Dall'ultima eruzione il sistema vulcanico ha continuato a manifestare il suo persistente stato di attività

attraverso terremoti (il più disastroso avvenne a Casamicciola nel 1882) e una diffusa attività fumarolica e idrotermale.

Il comportamento passato e lo stato attuale del sistema vulcanico di Ischia suggeriscono che esso è ancora attivo e che può dare eruzioni in futuro e che, se un'eruzione dovesse avvenire in tempi brevi o medi, potrebbe essere di tipo esplosivo. Pertanto il vulcano deve considerarsi pericoloso.

2.2. IL SISTEMA DI SORVEGLIANZA DELL'OSSERVATORIO VESUVIANO

L'Osservatorio Vesuviano, fondato nel 1841, primo osservatorio vulcanologico del mondo, gestisce il sistema di sorveglianza dei vulcani attivi dell'area napoletana. Tale sistema si è andato nel tempo adeguando allo sviluppo delle conoscenze vulcanologiche e tecnologiche, con l'obiettivo di permettere una previsione a breve termine sempre più accurata e tempestiva. Attualmente il sistema di sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano comprende reti geofisiche e geochimiche per il Vesuvio, i Campi Flegrei e Ischia (Figura 2.8).

Le reti geofisiche controllano l'attività sismica, le deformazioni del suolo e le variazioni del campo gravimetrico, mentre le reti geochimiche controllano le variazioni della composizione chimica dei gas emessi dalle fumarole e dal suolo, e di quelli disciolti nelle acque di falda.

Il controllo dell'attività sismica viene effettuato attraverso una rete di stazioni sismiche. La rete, costituita da un elevato numero di stazioni sismiche fisse; in caso di aumento dell'attività, viene potenziata con l'aggiunta di stazioni mobili.

In ciascuna stazione, opportuni sensori rilevano il moto del suolo e trasferiscono, in tempo reale, i dati rilevati al Centro di Sorveglianza, dove vengono raccolti, analizzati e interpretati. Le prime analisi che si effettuano sono finalizzate alla localizzazione dell'epicentro e dell'ipocentro della scossa registrata, ed alla valutazione della sua magnitudo, indice dell'energia liberata.

Il controllo delle deformazioni del suolo viene effettuato attraverso misure geodetiche periodiche o in continuo. A questo scopo vengono utilizzate diverse tecniche – livellazioni di precisione, EDM (Electronic Distance

Measurement), GPS (Global Positioning System), SAR (Synthetic Aperture Radar), per ciascuna delle quali è stata istituita un'apposita rete.

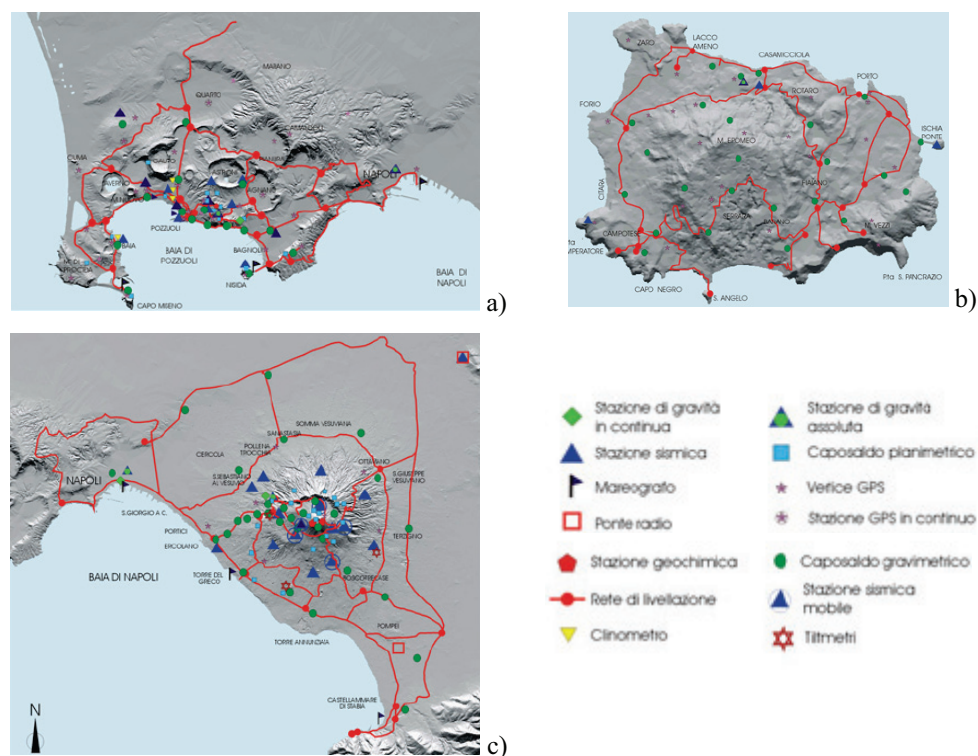


Figura 2. 8. Sistema di sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano per i vulcani napoletani: a) Campi Flegrei; b) Ischia; c) Vesuvio. (Orsi et al., 2002).

Ciascuna rete è configurata in modo da consentire una efficace caratterizzazione del campo di deformazione in quella specifica area. Le reti sono finalizzate al controllo delle deformazioni verticali ed orizzontali del suolo. Si misurano cioè, con cadenza determinata, le variazioni della quota e della distanza tra punti fissi. Da alcuni anni si utilizza prevalentemente il sistema GPS che, mediante l'impiego di satelliti artificiali e di una rete di vertici tridimensionali, consente di controllare con continuità le deformazioni del suolo. Inoltre, al Vesuvio e ai Campi Flegrei si misurano in continuo variazioni sia dell'inclinazione del suolo, attraverso una rete clinometrica, sia del livello del mare, attraverso una rete mareografica. Quest'ultima permette

di valutare, per confronto con il livello del mare registrato in aree stabili lontane dai vulcani, eventuali variazioni del livello del suolo.

Il controllo del campo gravimetrico avviene attraverso reti gravimetriche costituite da numerose stazioni fisse di misura. Periodiche misure dell'accelerazione di gravità in ciascuna di queste stazioni consentono di valutare con grande precisione eventuali variazioni del campo gravitazionale.

Apposite reti geochimiche controllano il flusso e la composizione dei gas delle fumarole, dei gas emanati dal suolo e delle acque di falda. In particolare, oltre al flusso di anidride carbonica (CO_2) e del vapore acqueo (H_2O), vengono rilevate le variazioni nel tempo di quelle specie chimiche che sono essenzialmente liberate dal magma, quali alcuni gas acidi, acido cloridrico (HCl), acido fluoridrico (HF), acido solforico (H_2SO_4). Tali variazioni possono essere indicative di una ripresa dell'attività vulcanica. Al Vesuvio sono misurati in continuo, attraverso una stazione automatica installata all'interno del cratere, il flusso di CO_2 dal suolo, la pressione atmosferica e la temperatura del suolo e dell'aria. Sono inoltre periodicamente analizzate le fumarole presenti lungo il bordo ed all'interno del cratere e quelle sottomarine nei pressi del porto di Torre del Greco. Nei Campi Flegrei viene eseguito il campionamento periodico delle fumarole della Solfatara e il monitoraggio, sia continuo che periodico, del flusso di CO_2 dal suolo, nell'area della Solfatara e in alcune aree limitrofe. Tramite una stazione idrometrica digitale, inoltre si controlla il livello e la temperatura della falda a quota -120 m nell'area vesuviana (Camaldoli della Torre).

2.3. IL RISCHIO VESUVIO E CAMPI FLEGREI

Analizzando le storie vulcanologiche del Vesuvio e dei Campi Flegrei è stato possibile stimare la probabilità di eruzione per i due vulcani e per ciascuna classe di esplosività.

Rispetto ai Campi Flegrei, il Vesuvio ha un numero più elevato di eruzioni a bassa esplosività (Figure 1.22 e 1.24). Le classi di VEI considerate come capaci di produrre rischio per l'area Vesuviana sono tre.

Il primo tipo comprende eruzioni moderate o a piccola scala, analoghe a quelle avvenute nel 1906 e nel 1944, definibili, secondo lo schema di Walker

(1973), *stromboliane*. A questo tipo di eruzione è attribuito un Volcanic Explosivity Index (VEI) pari a 3.

Il secondo tipo di eruzioni è a scala intermedia, riferibile come esempio alle eruzioni del 472 d.C. e del 1631. A una tale attività, definita *sub-pliniana*, è attribuito un VEI uguale a 4.

Il terzo tipo di eruzioni è a grande scala, analoghe all'eruzione del 79 d.C. che distrusse Ercolano e Pompei. Si tratta di eruzioni catastrofiche con alti valori di esplosività, definite *pliniane* con un valore di VEI uguale a 5.

I valori di probabilità di ciascuna classe, cioè la probabilità P di osservare almeno una eruzione di determinato VEI nei prossimi dieci, 50, 100 e 500 anni, sono indicati in Tabella 2.1 e sono stati valutati da Scandone et al. (1993) & da Dobran e Mascolo (1998).

Tabella 2. 1 Probabilità di occorrenza di eruzioni vesuviane
(Scandone et al., 1993 & Dobran e Mascolo, 1998).

VEI	Tipologia	Eruzioni tipo	P 10 anni	P 50 anni	P 100 anni	P 500 anni
3	Stromboliana	1906 - 1944	0,989	-	-	-
4	Sub-pliniana	472dC - 1631	0,175	-	-	-
5	Pliniana	Pompei, 79dC	0,030	0,75	0,90	0,99

Scandone et al. (1993), con riferimento alle probabilità di occorrenza di eruzioni vesuviane in un intervallo temporale di 10 anni, hanno proposto la classificazione di Rischio vulcanico dei comuni vesuviani riportata in Figura 2.9. Le classi di rischio sono basate su una scala logaritmica e quindi ogni passaggio di classe comporta perdite maggiori di un ordine di grandezza. Il prodotto tra la probabilità assoluta di eruzione e la probabilità relativa che un'area intorno al vulcano sia interessata da una certa fenomenologia dà l'Hazard. I criteri utilizzati per il calcolo delle probabilità relative sono diversi a seconda dell'intensità delle eruzioni e delle loro caratteristiche. In particolare la probabilità relativa che un'area intorno al vulcano sia interessata da lave, da flussi piroclastici e lahars è stata stimata in base alla morfologia dell'area, alla passata storia eruttiva ed all'entità dell'eruzione in oggetto.

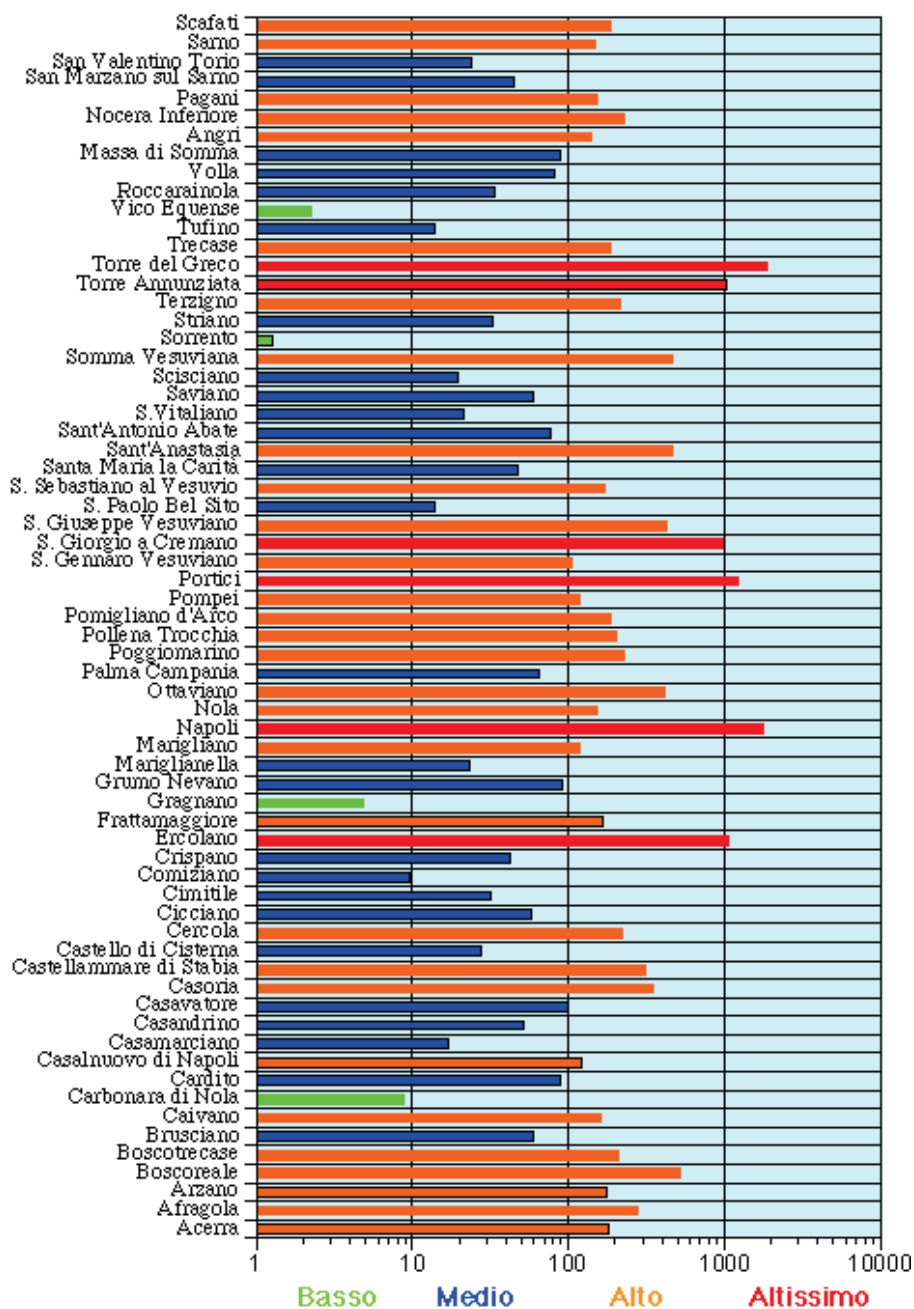


Figura 2. 9. Classificazione di Rischio vulcanico dei comuni vesuviani (Scandone et al., 1993).

Come valori di vulnerabilità per vite umane sono stati attribuiti valori molto bassi per quanto riguarda le lave e valori più elevati, decrescenti con la distanza, per le fenomenologie di flussi piroclastici e lahars. Come parametro di Valore è stato considerato il numero di abitanti residenti in ciascun comune.

Per i comuni che ricadono nelle classi di rischio Alto e Altissimo, è necessario che, in caso di emergenza vulcanica, vengano adottate misure di evacuazione o quanto meno di riduzione del numero di abitanti esposti (evacuazione di ospedali, persone inabili, ecc). In base a questa suddivisione si nota che i sei comuni con rischio Altissimo sono i comuni di Torre Annunziata e Torre del Greco, San Giorgio a Cremano, Portici, Ercolano e Napoli (zona orientale). Per questi comuni si impongono delle scelte drastiche per la riduzione del rischio ed è ovvio che devono essere quelli sui quali si devono concentrare i principali interventi della Protezione Civile in caso di imminenza di attività vulcanica. Per i comuni che ricadono nella categoria ad alto rischio il discorso è simile. Tuttavia questi si trovano in una zona abbastanza ampia attorno al vulcano e quindi gli interventi in caso di imminenza di attività vulcanica devono essere valutati caso per caso. Per i comuni che ricadono nelle altre due classi sarebbe opportuno prevedere delle misure tecniche da adottare in caso di eruzione vulcanica, senza tuttavia ricorrere a misure drastiche di evacuazione.

Nel quadro generale della mappa di rischio schematica illustrata in Figura 2.10 risulta evidente che l'area esposta a maggior rischio è quella costiera e ciò sia per l'altissima densità di abitanti, sia per la morfologia e relativa vicinanza dei centri abitati al vulcano.

In questo quadro va sottolineata la particolare situazione di Napoli, la quale deve il suo coefficiente di rischio elevatissimo prevalentemente ad eventi con VEI=4 (60%) e VEI=5 (40%). Nonostante la distanza, la morfologia e una probabilità relativamente bassa che questi eventi si verifichino nel corso del prossimo decennio, l'elevatissimo numero di persone residenti nelle zone orientali della città fa rientrare quest'area fra quelle con maggior coefficiente di rischio.

Come per il Vesuvio, Scandone et al. (1993) hanno proposto stime di rischio anche per i Campi Flegrei. In questo caso, mancando un apparato centrale dal quale attendersi un'eruzione, è stata considerata la possibilità di apertura di bocche eruttive in ciascun punto dell'area in oggetto. Su questa

base, si è proceduto alla elaborazione di una carta con indicazione delle zone a differente probabilità di apertura di centri eruttivi. Le classi di VEI considerate in grado di produrre rischio per l'area flegrea e zone esterne sono quattro.

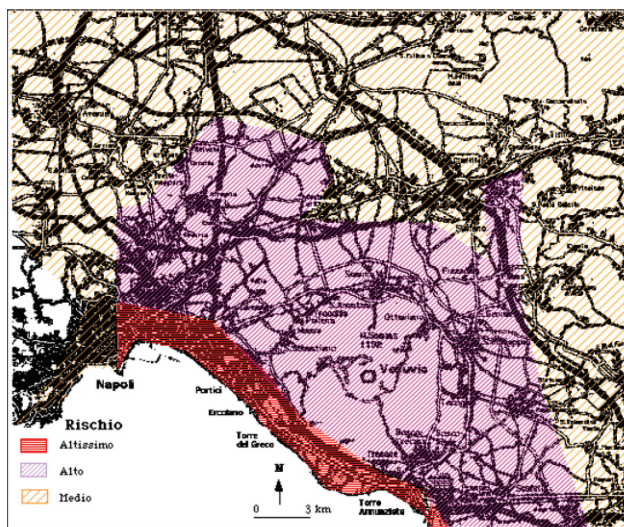


Figura 2. 10. Mappa di Rischio vulcanico dell'area vesuviana (Scandone et al., 1993).

Il primo tipo è quello che comprende le eruzioni moderate o a piccola scala, analoghe a quella avvenuta nel 1538 con l'eruzione di Monte Nuovo, che si possono definire, *stromboliane*. A questo tipo di eruzione è stato attribuito un Volcanic Explosivity Index (VEI) pari a 3.

Il secondo tipo di eruzioni è a scala intermedia, paragonabili alle eruzioni di Astroni ed Averno avvenute 3700 anni fa. A una tale attività, definita *sub-pliniana*, è stato attribuito un VEI uguale a 4.

Il terzo tipo di eruzioni è a grande scala come le eruzioni del Gauro o delle Pomici Principali avvenute circa 10000 e 9000 anni fa. Si tratta di eruzioni catastrofiche con alti valori di magnitudo, intensità ed esplosività; sono dette *pliniane* ed è stato loro attribuito un valore del VEI uguale a 5.

Il quarto tipo di eruzioni è a scala regionale, cioè con effetti su un'area più ampia di quella flegrea e napoletana, confrontabili con l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano che ha dato luogo alla formazione della caldera flegrea 12000 anni fa. A una tale attività, definita *ultra-pliniana*, è stato attribuito un VEI uguale a 6.

I valori di probabilità di ciascuna classe sono indicati in Tabella 2.2.

Tabella 2. 2. Probabilità di occorrenza di eruzioni dei Campi Flegrei.
(Scandone et al., 1993).

VEI	Tipologia	Eruzioni tipo	P 10 anni
3	Stromboliana	Monte Nuovo, 1538	0,99
4	Sub-pliniana	Astroni ed Averno, 3700 anni fa	0,45
5	Pliniana	Pomici principali, 9000 anni fa Gauro 10000 anni fa	0,19
6	Ultra-Pliniana	Tufo giallo napoletano, 12000 anni fa	0,08

In questo caso il rischio di perdita di vite umane deriva principalmente o dall'apertura di bocche eruttive o dal raggiungimento dell'area da parte di un flusso piroclastico o di un surge. L'apertura di una bocca eruttiva in un posto piuttosto che in un altro avrà conseguenze differenti a seconda dell'urbanizzazione dell'area e, per questa ragione, si è valutata *un'area di avvertibilità*. L'area di avvertibilità è, per ciascun punto, l'area entro la quale si possono aprire bocche eruttive dalle quali venga emesso un flusso piroclastico che raggiunga il punto considerato.

Analogamente per il Vesuvio, il Rischio è calcolato sulla base della popolazione residente.

In Figura 2.11 è riportato il Rischio per i comuni flegrei ed extraflegrei. Risulta evidente che i comuni esposti a maggior Rischio sono Pozzuoli e Napoli dove il grado è addirittura catastrofico.

In Figura 2.12 è mostrata la microzonazione del Rischio per quanto riguarda esclusivamente l'area flegrea (in questo caso il settore della città di Napoli compreso nell'area flegrea ha un valore classificato come Altissimo; il passaggio alla categoria superiore si ha con l'inclusione del resto della città). Nella parte centrale dei Campi Flegrei, e cioè nella zona di Pozzuoli, sono localizzate le maggiori probabilità di accadimento degli eventi vulcanici considerati. La città di Napoli raggiunge un valore di Rischio che probabilmente non ha alcun riferimento al mondo per l'alta densità abitativa.

I Campi Flegrei, al pari dell'area vesuviana, rappresentano una situazione paradossale in quanto le scelte urbanistiche finora adottate non hanno assolutamente tenuto conto dell'ambiente naturale. Si è giunti ad un punto tale

che per poter ridurre il Rischio a valori medi sarebbe necessaria solo una drastica riduzione delle popolazioni esposte.

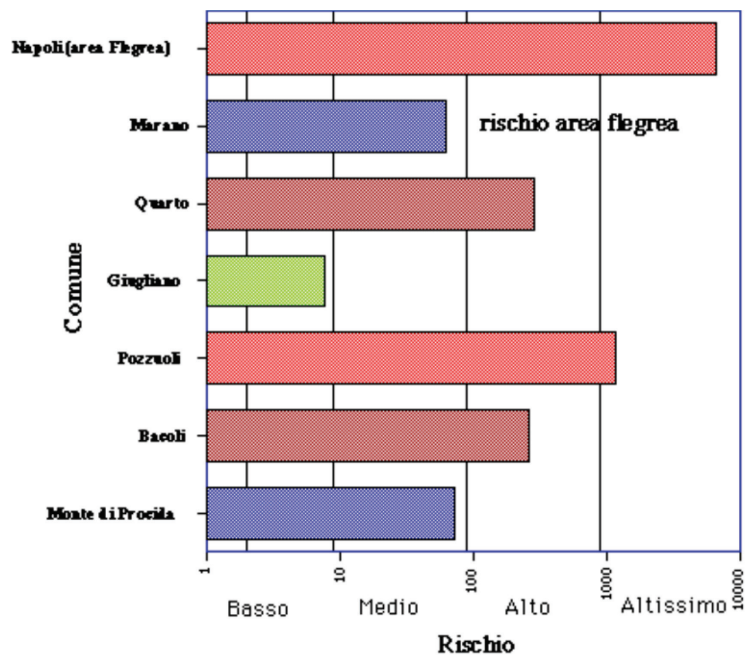


Figura 2. 11. Classificazione di Rischio vulcanico dei comuni flegrei (Sandone et al., 1993).

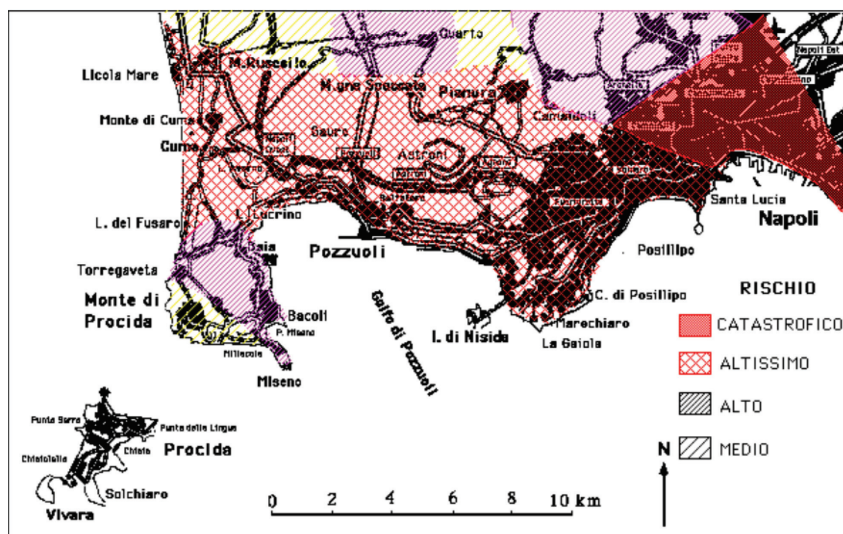


Figura 2. 12. Mappa di microzonazione del Rischio nell'area flegrea (Scandone et al., 1993).

Ovviamente ciò non appare possibile per gli alti costi sociali ed economici. La mancata attenzione a questi problemi ha già avuto costi rilevanti per la comunità nel corso delle crisi bradisismiche dei Campi Flegrei del 1970-72 e 1982-84. Durante quelle crisi, una parte notevole della popolazione di Pozzuoli è stata evacuata permanentemente dall'area del centro storico e ricollocata in aree dello stesso comune aventi gli stessi coefficienti di rischio. Inoltre i nuovi insediamenti hanno rappresentato un nucleo di nuova urbanizzazione che ha determinato l'aumento complessivo della popolazione dell'area flegrea.

2.4. I PIANI DI EMERGENZA

I piani di emergenza sono uno strumento indispensabile per la mitigazione del rischio. Per il rischio vulcanico sono elaborati in funzione dello scenario eruttivo e dei livelli di allerta definiti per uno specifico vulcano e per un determinato tempo, della popolazione e della sua distribuzione sul territorio, delle infrastrutture e della loro vulnerabilità, e del comportamento più probabile delle persone. Ciascuno di questi parametri può variare nel tempo sia per il progredire delle conoscenze scientifiche, sia per variazioni del comportamento del vulcano, sia perché provvedimenti amministrativi possono modificare l'assetto urbanistico del territorio, sia infine per l'effetto di programmi di educazione e informazione. Pertanto un piano di emergenza non deve essere considerato uno strumento statico e valido per un tempo indefinito. Al contrario, esso deve essere inteso come uno strumento dinamico da sottoporre a periodico aggiornamento in funzione del variare dei parametri su cui è stato elaborato.

In base ai risultati degli studi vulcanologici condotti recentemente al Vesuvio, che hanno consentito di ricostruirne la storia eruttiva, il comportamento del sistema magmatico nel tempo e lo stato attuale di attività del vulcano, il Gruppo Nazionale per la Vulcanologia ha definito la massima eruzione attesa nel caso di ripresa dell'attività eruttiva a breve-medio termine (dell'ordine di decine di anni). Tale evento è rappresentato da un'eruzione sub-pliniana del tipo di quella verificatasi nel 1631.

L'eruzione del 1631 è stata la più violenta e distruttiva della storia del Vesuvio nell'ultimo millennio e si verificò dopo un periodo di quiescenza del vulcano durato alcuni secoli. Essa causò la devastazione di un'area di circa 500km² e la morte di circa 4000 persone.

In base allo scenario eruttivo della massima eruzione attesa è stato elaborato da una Commissione istituita dal Ministro della Protezione Civile un piano di emergenza nazionale dell'area Vesuviana. Il piano è attualmente in via di aggiornamento da parte della "Commissione incaricata di provvedere all'aggiornamento dei piani di emergenza dell'area flegrea e dell'area vesuviana". E' importante evidenziare che l'evento massimo atteso non è necessariamente il più probabile: l'effettiva eruzione potrebbe essere più modesta dell'evento considerato come riferimento per l'elaborazione del piano di emergenza. Poiché è impossibile, con le attuali conoscenze, prevedere prima dell'eruzione la sua dinamica eruttiva e la quantità di magma emesso, la decisione presa dalla Protezione Civile è stata quella di considerare, come scenario di riferimento, l'evento massimo atteso nel caso di ripresa dell'attività del Vesuvio a breve-medio termine. Lo scenario di riferimento prevede che potranno verificarsi dapprima una serie di esplosioni connesse alla riapertura del condotto, precedute da sismicità, deformazione del suolo, incremento delle emissioni gassose, attivazione di nuove fumarole e apertura di fratture. Si innalzerà poi dal vulcano una colonna eruttiva composta da vapore, gas, frammenti di magma (pomici e ceneri) e frammenti di roccia (litici), che potrà raggiungere un'altezza di decine di chilometri. La parte sommitale della colonna tenderà a espandersi radialmente, ma spinta dai venti in quota, si muoverà verso Est, secondo la direzione dei venti prevalenti in alta quota. Dispersa dal vento, la nube farà cadere una pioggia di frammenti piroclastici in una zona sottovento, l'accumulo di queste particelle al suolo potrà provocare il crollo di tetti, impedire il funzionamento di alcune reti di servizi e indurre problemi respiratori. La parte della colonna eruttiva che non riesce a sostenere il peso del materiale solido trasportato, crollerà al suolo generando flussi piroclastici, che avanzeranno lungo i versanti del vulcano a grande velocità ed elevato potere distruttivo. Probabili piogge indotte dalle perturbazioni delle condizioni atmosferiche causate dall'eruzione potranno mobilitare il materiale piroclastico depositato al suolo, provocando colate di fango e alluvionamenti delle aree morfologicamente depresse.

L'unica difesa per la popolazione da un'eruzione esplosiva del tipo di quella descritta è l'allontanamento dall'area a maggior rischio, cioè quella che può essere invasa dai flussi piroclastici, prima dell'inizio dell'eruzione.

Negli ultimi anni evacuazioni tempestive hanno salvato centinaia di migliaia di vite umane; basti citare per tutte le recenti eruzioni di vulcani Pinatubo nelle Filippine, Usu in Giappone, Tavurvur e Vulcan in Nuova Guinea e Popocatepetl in Messico. Al contrario, decine di migliaia di morti si sono avute quando ai fenomeni precursori manifestati dal vulcano non sono seguiti interventi di protezione civile, come al Nevado del Ruiz in Colombia, nel 1986. La decisione di allontanare la popolazione dall'area a maggior rischio sarà presa sulla base dell'analisi dei fenomeni precursori rilevati dal sistema di sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano.

Le informazioni storiche relative agli ultimi secoli di attività del Vesuvio e i fenomeni registrati prima delle ultime eruzioni indicano che, come per la maggior parte dei vulcani, le eruzioni vesuviane hanno avuto fenomeni precursori, quali intensa attività sismica, vistose deformazioni del suolo e intensificazione dell'attività fumarolica.

L'analisi delle fonti storiche sui fenomeni precursori dell'eruzione del 1631 ha permesso di stabilire che alcune settimane prima dell'eruzione si verificarono terremoti percepiti anche a Napoli e vistose deformazioni del suolo, concentrate nella zona craterica e pericraterica. Come precursore a breve-medio termine, fu osservato l'abbassamento del livello e l'intorbidamento dell'acqua nei pozzi su una vasta area. Precursori a breve, brevissimo termine furono un forte aumento dell'emissione di gas e vapori al cratere, fenomeni acustici e sismici (tremore) legati agli ultimi stadi della risalita del magma verso la superficie.

Nessuno considerò questi fenomeni un avvertimento della ripresa di attività del Vesuvio, come scrive Giulio Cesare Braccini riferendosi all'intorbidamento delle acque nei pozzi, nel suo resoconto sull'eruzione del 1631: "Se fossero stati accorti avrebbero da questo solo, quando non da altro potuto prevedere i terremoti che appresso ne seguirono, e salvarsi; sebbene come disse colui: perituri non recipiunt consilia..."

Quindi, prima dell'eruzione del 1631 e nonostante la mancanza di qualsiasi strumentazione, furono osservati vari fenomeni precursori. Oggi, con i sofisticati strumenti scientifici a disposizione, è legittimo ritenere che tali

fenomeni saranno avvertiti con anticipo ancora maggiore, come indica anche l'esperienza maturata in varie parti del mondo su vulcani simili al Vesuvio.

Le evidenze storiche dell'esistenza di fenomeni precursori e la conoscenza oggi acquisita sulla struttura e storia del vulcano, hanno permesso di definire livelli di allerta, in funzione dei quali il piano di emergenza si articola in varie fasi. Tali livelli caratterizzano l'evoluzione del vulcano fino all'eruzione e sono definiti da variazioni della sismicità, del campo gravimetrico e magnetico, della composizione chimica e della temperatura delle fumarole, da progressive deformazioni del suolo, ecc. I livelli sono stati definiti anche per analogia con l'andamento delle variazioni di parametri fisici e chimici registrate su vulcani simili per struttura al Vesuvio. I dati raccolti sull'attività del Vesuvio negli ultimi decenni hanno consentito di definire il livello base, caratteristico del vulcano negli ultimi decenni. Tale livello è rappresentato da assenza di deformazione del suolo, bassa sismicità, assenza di significative variazioni del campo gravimetrico, valori costanti di composizione e valori decrescenti della temperatura dei gas fumarolici.

I livelli di allerta successivi al livello base sono legati a progressive variazioni dei parametri misurati (Figura 2.13).

Il piano individua le azioni da compiersi in funzione del livello di allerta e tre specifiche aree di intervento, denominate Zona Rossa, Zona Gialla e Zona Blu, sulla base del tipo e dell'entità dei pericoli da cui potrebbero essere interessate (Figura 2.14).

La Zona Rossa è stata individuata sia utilizzando i dati relativi alla distribuzione dei prodotti delle eruzioni pliniane e sub-pliniane, sia simulando al calcolatore le diverse fasi dell'eruzione massima attesa. Vaste porzioni di questa zona potrebbero essere invase da flussi piroclastici e colate di fango, e coperte da spessi accumuli di prodotti da caduta. Essa ha un'estensione di circa 200Km^2 e comprende 18 Comuni, tutti della provincia di Napoli, in cui vive una popolazione di circa 600.000 abitanti. Durante l'eruzione del 1631, quasi il 20% di questa zona fu distrutto da flussi piroclastici. La parete del Monte Somma che negli ultimi secoli ha protetto i centri abitati, ubicati a Nord, dalle colate laviche, potrebbe non essere alta abbastanza da impedire il suo scavalco da parte dei flussi piroclastici. Per questo motivo la Zona Rossa ha geometria circolare. Per la velocità e l'elevato potere distruttivo dei

flussi piroclastici, le popolazioni dovranno allontanarsi da questa zona prima dell'inizio dell'eruzione.

LIVELLI DI ALLERTA	STATO DEL VULCANO	PROBABILITÀ DI ERUZIONE	TEMPO DI ATTESA ERUZIONE	SISTEMA DI PROTEZIONE CIVILE		FASI
				Comunità Scientifica	Risposte Operative	
Base	Nessuna variazione significativa di parametri controllati	Molto bassa	Indefinito, comunque non meno di diversi mesi	Attività di sorveglianza secondo quanto programmato	Commissione Nazionale Attività ordinaria	
Attenzione	Variazione significativa di parametri controllati	Bassa	Indefinito, comunque non meno di alcuni mesi	Stato di allerta tecnico scientifico ed incremento dei sistemi di sorveglianza	Dipartimento della Protezione Civile - Attivazione della fase di attenzione - Comunicazione al Prefetto di Napoli Prefettura di Napoli - Convocazione del C.C.S. - Organizzazione supporto logistico alla Comunità Scientifica - Organizzazione delle prime informazioni alla popolazione unitamente ai Sindaci dei comuni interessati - Comunicazione a: a) Dipartimento della Protezione Civile b) Ministero dell'Interno c) Presidente Giunta Regionale Campania d) Presidente Amministrazione Provinciale di Napoli e) Sindaci	I FASE Attenzione
Preallarme	Ulteriore variazione di parametri controllati	Media	Indefinito, comunque non meno di alcune settimane	Continua l'attività di sorveglianza, simulazione dei possibili fenomeni eruttivi	Dipartimento della Protezione Civile - Attivazione della fase di preallarme - Richiesta dichiarazione Stato d'Emergenza - Convocazione Comitato Operativo di Protezione Civile - Nomina del Commissario Delegato da parte del P.C.M. - Attivazione della Direzione di Comando e Controllo Dipartimento della Protezione Civile (DI.COMA.C.) - Attivazione del C.C.S. nelle Prefetture della Campania e delle regioni ospitanti - Attivazione degli organismi Regionali e Provinciali di P.C. della Campania e di tutte le regioni ospitanti - Posizionamento soccorritori - Allontanamento spontaneo della popolazione	II FASE Preallarme
Allarme	Comparsa di fenomeni avanzamento di parametri controllati che indicano una dinamica pre-eruttiva	Alta	Da settimane a mesi	Sorveglianza con sistemi remoti	Dipartimento della Protezione Civile (DI.COMA.C.) - Attivazione della fase di allarme - Evacuazione dei 18 comuni esposti - Allontanamento ogni famiglia con mezzi propri - Attivazione fase Operativa alternativa - Rupeggiamento dei soccorritori - Sostanzamento Credi Operativi in Zona Gialla - Controllo del territorio evacuato al limite esterno della zona rossa - Allontanamento strutture ricettive della Campania	III FASE Allarme
Evento in corso (Eruzione)				Sorveglianza con sistemi remoti, definizione cono di interferenza dell'eruzione con la zona gialla	Dipartimento della Protezione Civile (DI.COMA.C.) - Controllo fenomeno per la definizione delle aree della zona gialla da evacuare - Raccolta, elaborazione e catalogazione dati sull'andamento del fenomeno e della operazione - Predisposizione strutture ricettive della Campania ed evacuazione Zona Gialla	IV FASE Evento in corso
				Continua la sorveglianza con sistemi remoti, inizia la ricostruzione dei sistemi di sorveglianza in loco	Dipartimento della Protezione Civile (DI.COMA.C.) - Ricollocazione delle strutture operative sul territorio - Operazioni tecnico-scientifiche di verifica del territorio finalizzate al rientro della popolazione (Regione, Provincia, Comuni, Prov. OO.PP., Gruppi Nazionali, VV.F.) Dipartimento della Protezione Civile - Rientro controllato - Richiesta revoca stato di emergenza	V FASE Dopo l'evento

Figura 2. 13. Modulo operativo del piano emergenza Vesuvio (Protezione Civile, 2010).

La Zona Gialla è quell'area che potrebbe essere interessata da caduta di particelle con carico maggiore di 300Kg/m^2 , che potrebbe provocare il collasso dei tetti. Essa ha un'estensione di 1.100Km^2 e comprende alcune decine di Comuni delle province di Napoli, Salerno, Avellino, Caserta e Benevento. Solamente un settore di questa zona sarà interessato dalla caduta di grandi quantità di ceneri, pomici e frammenti di roccia, che potranno provocare crollo di tetti, oscurità, disturbi alla respirazione, blocco dei motori, difficoltà di circolazione dei veicoli ed interruzione del normale funzionamento delle reti di servizi. Il settore della zona gialla che sarà interessato dalla caduta di particelle non può essere individuato in anticipo perché esso sarà definito dall'altezza che la colonna eruttiva raggiungerà e

dalla direzione e velocità dei venti in quota al momento dell'eruzione. Pertanto, solo una parte degli abitanti della zona gialla dovrà allontanarsi durante l'eruzione. Nel 1631 circa il 10 % di quest'area fu gravemente danneggiata.

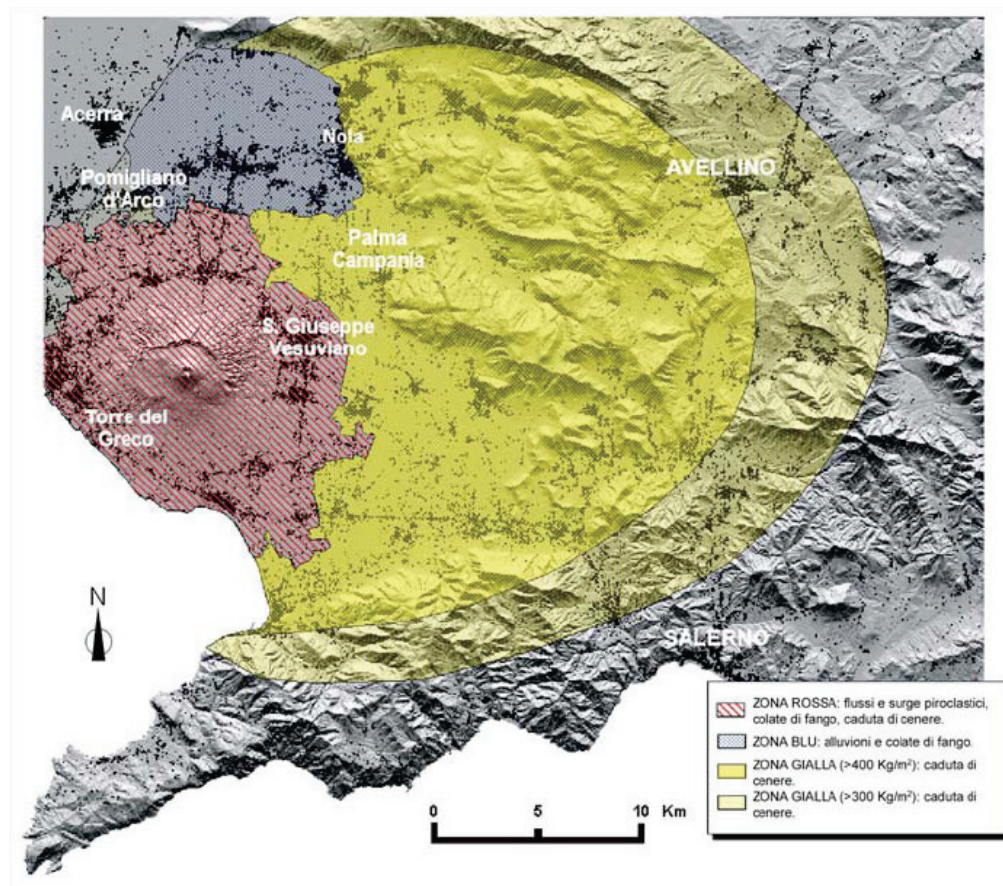


Figura 2. 14. Carta del rischio vulcanico dal piano di emergenza Vesuvio (Protezione Civile, 2010).

La Zona Blu è quell'area che, oltre ad essere esposta a caduta di particelle con carico superiore a 300Kg/m^2 , potrebbe essere invasa da colate di fango ed essere interessata da inondazioni e alluvionamenti. Essa ha un'estensione di circa 100Km^2 e corrisponde alla conca di Nola.

Oggi, oltre 300.000 persone vivono all'interno della parte oggi attiva dell'intera struttura dei Campi Flegrei, la caldera, mentre quelle che vivono nelle sue immediate vicinanze sono più di un milione. Per l'alta pericolosità della caldera e per l'intensa urbanizzazione sia al suo interno che nelle aree limitrofe, il rischio vulcanico è estremamente alto.

Allo scopo di ridurre questo alto rischio, la Protezione Civile ha istituito una Commissione Nazionale incaricata di provvedere all'aggiornamento del piano di emergenza già esistente da mettere in atto in caso di ripresa dell'attività eruttiva. Il lavoro della Commissione è ancora in corso.

La storia vulcanologica della caldera dei Campi Flegrei negli ultimi 10.000 anni precedentemente descritta pone dei vincoli alla definizione dello scenario eruttivo in caso di ripresa dell'attività in tempi medio-brevi. L'eruzione del Tufo Giallo Napoletano ed il relativo collasso calderico hanno significativamente modificato le condizioni del vulcano. Inoltre, la relazione tra dinamica della caldera del Tufo Giallo Napoletano e localizzazione dei centri eruttivi nel tempo, mostra che durante il secondo periodo di quiescenza (8.200 – 4.800 anni fa), e, in particolare, prima dell'inizio della terza epoca, c'è stata una modificazione nel campo di sforzo all'interno della caldera. Questo campo non ha più subito modificazioni come dimostrano la geometria delle deformazioni del suolo e la sismicità durante i recenti eventi bradisismici. Pertanto, ai fini della valutazione della pericolosità della caldera, è significativo prendere in considerazione gli ultimi 5.000 anni di attività e il suo stato attuale. Non essendo possibile, come per il Vesuvio, individuare un'eruzione di riferimento, lo scenario è stato costruito in base alle fenomenologie eruttive (tipo di eruzione, volume di magma emesso) che più frequentemente si sono manifestate. Queste sono fondamentalmente caratterizzate da alternanze di esplosioni magmatiche e freato- magmatiche. Le esplosioni magmatiche determineranno la formazione di una colonna sostenuta, con un comportamento simile a quello descritto per lo scenario eruttivo del piano di emergenza "Vesuvio", e conseguente caduta di particelle al suolo.

Le esplosioni freato- magmatiche genereranno correnti piroclastiche (prevalentemente surges), che fluiranno al suolo ad alta velocità. In relazione allo scenario eruttivo ipotizzato dalla comunità scientifica, e alle carte di

pericolosità da questa prodotte per le fenomenologie eruttive, la Protezione Civile ha definito l'area a più alto rischio.

Quest'ultima comprende l'area esposta al pericolo di scorrimento di correnti piroclastiche, ed individuata come Zona Rossa, attualmente abitata da circa 350.000 persone (Figura 2.15). In essa ricadono i comuni di Monte di Procida e Bacoli e parte di quelli di Pozzuoli e Napoli.

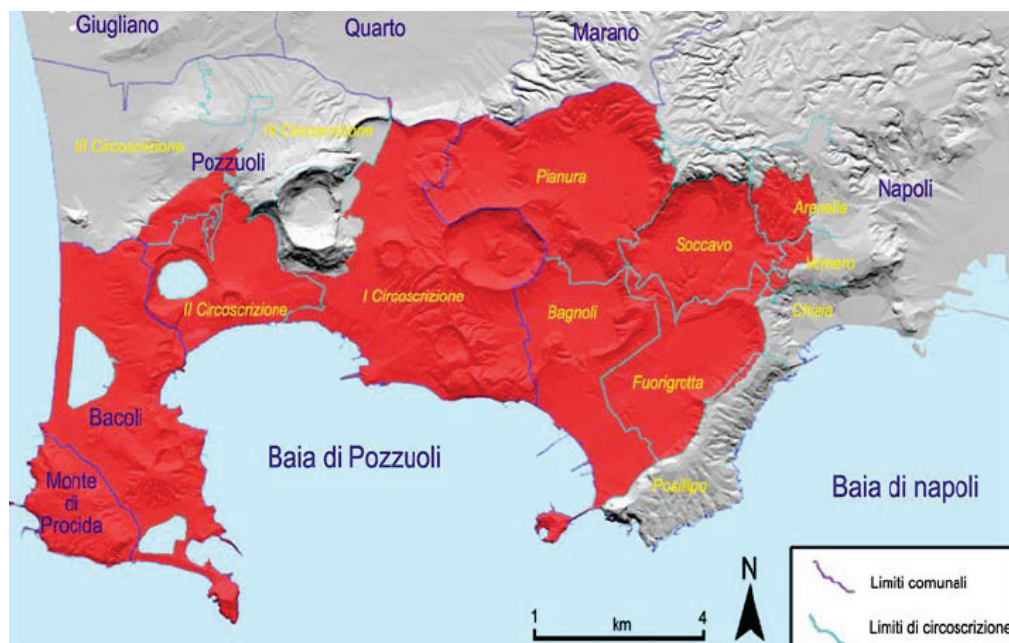


Figura 2. 15. Carta di rischio vulcanico per scorrimento di flussi piroclastici nella caldera flegrea (Protezione Civile, 2010).

In considerazione delle prevedibili variazioni dei parametri fisici e chimici del sistema vulcanico che saranno registrate dal sistema di sorveglianza dell'Osservatorio Vesuviano, sono stati definiti quattro livelli di allerta (Figura 2.16). Questi vanno dal livello di base, che caratterizza lo stato attuale della caldera, al livello di allarme, caratterizzato da un'alta probabilità di eruzione. In quest'ultimo caso la Protezione Civile ha previsto l'allontanamento della popolazione dalla zona rossa, e il suo trasferimento in altre regioni italiane. In considerazione degli eventi bradisismici che più volte si sono manifestati negli ultimi trent'anni, per la porzione di zona rossa che

potrebbe esserne interessata, è in elaborazione un Piano Stralcio per l'emergenza bradisismica, con interventi che prevedono anche il trasferimento della popolazione coinvolta in strutture della Campania. Attualmente in elaborazione è anche una dettagliata zonazione dell' area napoletano-flegrea esposta al pericolo di caduta di materiale piroclastico, e la definizione della strategia di intervento in quest'area, denominata Zona Gialla.

LIVELLI DI ALLERTA	STATO DEL VULCANO	PROBABILITÀ DI ERUZIONE	TEMPO DI ATTESA ERUZIONE	AZIONI	COMUNICAZIONI
Base	Nessuna variazione significativa di parametri controllati	Molto bassa	Indefinito, comunque non meno di diversi mesi	Attività di sorveglianza secondo quanto programmato	L'Osservatorio Vesuviano produce bollettini semestrali sull'attività del vulcano
Attenzione	Variazioni significative di parametri controllati	Bassa	Indefinito, comunque non meno di alcune mesi	Stato di allerta tecnico scientifico ed incremento dell'attività di sorveglianza	L'Osservatorio Vesuviano quotidianamente produce un bollettino e comunica le informazioni sullo stato del vulcano al Dipartimento della Protezione Civile
Preallarme	Ulteriori variazioni di parametri controllati	Media	Indefinito, comunque non meno di alcune settimane	Continua l'attività di sorveglianza, simulazione dei possibili fenomeni eruttivi	L'Osservatorio Vesuviano comunica continuamente le informazioni sullo stato del vulcano al Dipartimento della Protezione Civile
Allarme	Comparso di fenomeni e/o incremento di parametri controllati che indicano una dinamica pre-eruttiva	Alta	Da giorni a mesi	Sorveglianza con sistema allarme	L'Osservatorio Vesuviano comunica continuamente le informazioni sullo stato del vulcano al Dipartimento della Protezione Civile

Figura 2. 16. Livelli di allerta e relative azioni da parte della comunità scientifica per la caldera dei Campi Flegrei (Protezione Civile, 2010).

Capitolo 3

Incidenza delle eruzioni vulcaniche sul costruito

3.1. FENOMENI LEGATI ALLE ERUZIONI VULCANICHE

I fenomeni legati ad un'eruzione vulcanica dipendono, innanzitutto, dalla tipologia della stessa. Nel caso delle eruzioni esplosive, il prodotto principale coincide con le *lave*, mentre nel caso delle eruzioni esplosive i prodotti sono i *piroclasti* espulsi attraverso la colonna eruttiva. Essi, in parte, entrano in dispersioni solido-gas chiamate *flussi piroclastici* e *surges*, rispettivamente con alta o bassa concentrazione di particelle, mentre il resto cade per gravità (*depositi da caduta*) o è esploso direttamente in aria dal cratere (*bombe* e *missili vulcanici*).

A questi fenomeni, direttamente riconducibili ai prodotti eruttivi, se ne aggiungono altri legati ad effetti indotti. Le eruzioni, ad esempio, sono in genere accompagnate da movimenti sismici (*terremoti vulcanici*), prodotti dalla rottura delle rocce per effetto dell'ascesa del magma, e da *lahars*, flussi di materiale piroclastico e acqua, messi in moto dalle piogge che spesso si generano durante eventi vulcanici esplosivi. Da non sottovalutare, inoltre, è la possibilità di *tsunami* vulcano-indotti, generati da terremoti sottomarini o cadute in mare di materiale lavico o piroclastico.

Tutti i fenomeni elencati verranno di seguito illustrati, attraverso una riorganizzazione della letteratura scientifica che, a partire da una descrizione

nfisico-vulcanologica, ha consentito di fornire una schematizzazione di ciascuno degli eventi considerati, in termini di azioni ed effetti sulle strutture investite (Mazzolani et al., 2008 e 2009a; Zuccaro et al., 2010a).

3.2. LE LAVE

3.2.1. Fenomeno

Le *lave* sono magmi eruttati in superficie. Esse possono formare ampie colate oppure raffreddarsi immediatamente al di sopra del condotto vulcanico dando luogo a strutture cupoliformi dette *duomi lavici*.

Dal raffreddamento dei magmi si formano le *rocce ignee*. Se il processo avviene all'interno della terra, le rocce prendono il nome di rocce ignee intrusive. Se il raffreddamento avviene sulla superficie terrestre, le rocce vengono dette ignee effusive. Le rocce ignee sono costituite da minerali di varia natura, tra cui i più importanti hanno composizione silicatica e sono rappresentati da olivina, anfiboli, pirosseni, biotite, feldspati e quarzo.

Le proprietà fisiche dei magmi che rivestono maggiore importanza nella determinazione dei caratteri di una possibile eruzione sono, essenzialmente, la composizione chimica, la temperatura, la densità e la viscosità (Osservatorio Vesuviano, 2010).

Il componente chimico più abbondante in una roccia ignea (e quindi nel magma da cui deriva) è di gran lunga la silice, variando dal 35 all' 80% circa in peso. In funzione del diverso contenuto in SiO_2 è possibile classificare le rocce ignee secondo uno schema che può essere utile per una discussione circa le proprietà fisiche dei magmi. Sulla base di tale parametro si avranno, pertanto:

- rocce acide, con contenuto in silice $>63\%$;
- rocce intermedie, con contenuto in silice compreso tra 63 e 52%;
- rocce basiche, con contenuto in silice compreso tra 52 e 45%;
- rocce ultrabasiche, con contenuto in silice $<45\%$.

Molti tipi di rocce differenti possono essere compresi in ognuna di queste classi, sicché essi potranno essere distinti sulla base di altri caratteri, quali il contenuto in alcali o la saturazione in allumina.

La variazione di questi parametri si riflette sul comportamento reologico dei magmi e quindi, in definitiva, sulle caratteristiche delle eruzioni che essi possono alimentare.

I vari magmi presenti in natura possono essere caratterizzati da temperature estremamente variabili in funzione della composizione chimica e del contenuto in H_2O e CO_2 : in generale magmi più basici sono caratterizzati da più alte temperature al momento dell'eruzione (nell'ordine dei $1000 \div 1200^\circ C$), mentre magmi più acidi sono caratterizzati da temperature mediamente più basse (nell'ordine dei $700 \div 900^\circ C$). A parità di altre condizioni, un maggiore contenuto in componenti volatili (H_2O o CO_2 nella maggior parte dei casi) tenderà ad abbassare le temperature di solidus e liquidus di un fuso magmatico.

La densità di un magma dipende anch'essa principalmente dalla sua composizione, con magmi basici mediamente più densi di magmi acidi, anche se l'effetto di temperature più alte può essere determinante nel ridurre il valore qualunque sia la composizione chimica. La densità inoltre dipende strettamente dalla pressione confinante, aumentando all'aumentare di quest'ultima.

La viscosità può essere definita come la resistenza opposta da una sostanza a deformarsi sotto l'azione di una sollecitazione meccanica applicata.

Si immagini di avere un fluido in quiete, confinato tra due piastre A e B . Se si impone alla piastra A una forza che produca un moto con velocità $v=dx/dt$, all'interno del flusso si stabilirà un gradiente di velocità pari a dv/dy . Il flusso cioè comincerà a muoversi con velocità maggiore in prossimità della piastra A , secondo una legge precisa. La forza applicata su A (F/A), sarà infatti proporzionale al gradiente di velocità dv/dy , secondo un coefficiente di proporzionalità chiamato viscosità μ :

$$F/A = \mu dv/dy \quad (3.1)$$

In sintesi, la viscosità è un coefficiente che regola il moto di un fluido quando ad esso viene applicata una forza F . L'equazione (3.1) può essere scritta come:

$$\sigma = \sigma_0 dv/dy \quad (3.2)$$

dove σ è uguale a F/A e dv/dy rappresenta la variazione di velocità lungo l'asse y .

Tutti i fluidi che obbediscono all'equazione (3.2) vengono definiti *newtoniani*. Per essi la viscosità è indipendente dalla forza applicata, ed il rapporto tra forza e spostamento segue una legge lineare (Figura 3.1).

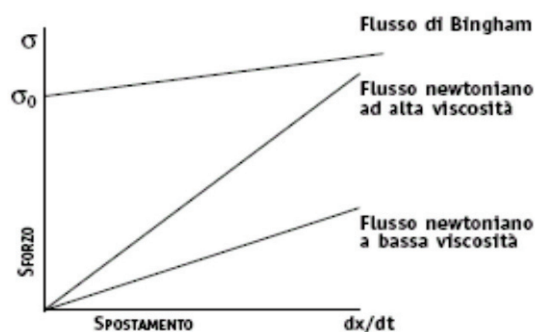


Figura 3. 1. Relazione sforzo-spostamento per flussi Newtoniani e di Bingham (Osservatorio Vesuviano, 2010).

Le sostanze newtoniane si deformano nel momento stesso in cui uno sforzo infinitesimale viene applicato: sostanze di questo genere sono ad esempio l'aria e l'acqua. Viceversa, sostanze in cui lo sforzo applicato non è in relazione lineare con la velocità di deformazione vengono definite sostanze *non newtoniane* o *pseudo-plastiche*. Quando, invece, una relazione lineare tra sforzo e velocità di deformazione esiste a partire da un determinato valore di sforzo applicato che deve essere superato prima che si abbia una apprezzabile deformazione, si parla di comportamento *non newtoniano di tipo Bingham*, e le sostanze caratterizzate da questo tipo di comportamento, vengono definite sostanze di Bingham. Il valore di sforzo che deve essere superato perché in queste sostanze si realizzi una apprezzabile deformazione è detto soglia di snervamento. In generale le lave, e quindi i magmi da cui esse derivano, possono essere considerate con buona approssimazione come fluidi non newtoniani caratterizzati da una soglia di snervamento, molto simili ad un fluido di Bingham ideale.

In generale, il moto di un fluidi è regolato dalla seguente equazione:

$$\sigma = \sigma_0 + dv/dy \, n \quad (3.3)$$

in cui σ è lo sforzo di taglio totale e σ_0 è la soglia di snervamento (per una sostanza di Bingham).

Per sostanze Newtoniane σ_0 è pari a zero ed n è pari a 1; per sostanze pseudo-plastiche σ_0 è pari a zero ed n è minore di 1; e per sostanze di Bingham σ_0 ha un valore finito ed n è pari a 1 (Figura 3.1).

Considerazioni sulla viscosità dei magmi sono importanti perché essa influenza la mobilità e la forma di lave eruttate come fluidi coerenti non frammentati, e perché influenza la velocità di vescicolazione che rappresenta un fattore di importanza determinante nel momento in cui ci si approssima ad una fase di frammentazione esplosiva del magma. La viscosità, inoltre, unitamente alla soglia di snervamento di un fluido, oltre a controllare la fluidità di un corpo lavico, ne può determinare anche la geometria e la morfologia. Lave basiche, fluide e ricche in gas (Figura 3.2a) danno eruzioni effusive accompagnate da fenomeni esplosivi di modesta entità quali jet di lava alti fino a molte centinaia di metri (fontane di lava); le stesse lave, se povere in gas, danno eruzioni effusive tranquille senza apprezzabili fenomeni esplosivi (Figura 3.2b). Le lave acide, viscose ricche in gas danno eruzioni esplosive di alta energia (Figura 3.2c); le stesse lave, se povere in gas, danno duomi lavici o colate di modesto spessore (Figura 3.2d).

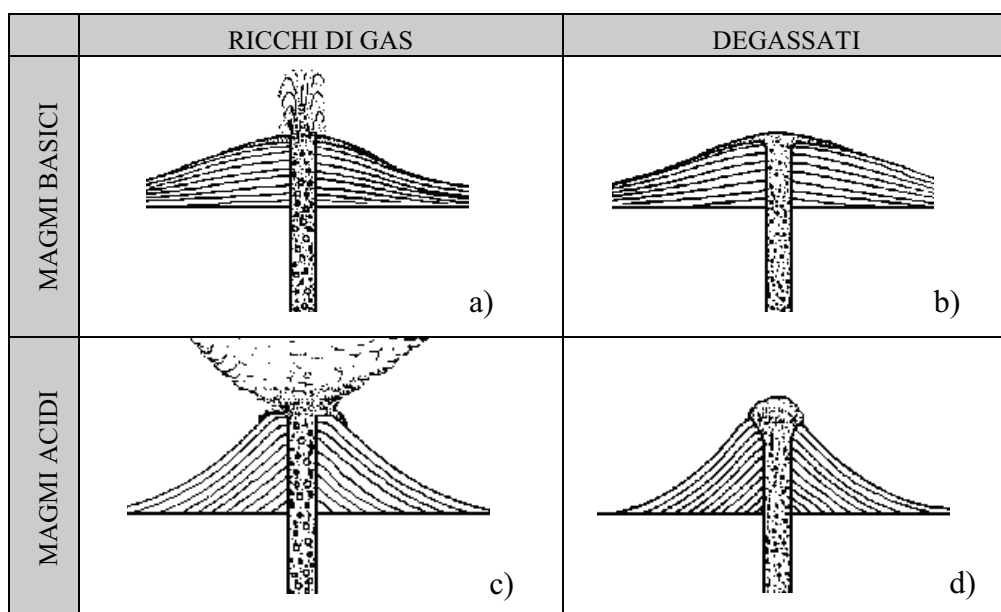


Figura 3. 2. Comportamento eruttivo dei magmi acidi e basici con diverso contenuto in gas.

Affinché una sostanza di Bingham possa fluire lungo un pendio è necessario che essa raggiunga uno spessore sufficiente a far sì che lo sforzo di taglio alla base del flusso sia superiore alla soglia di snervamento.

Lo spessore e la larghezza di un flusso, così come l'ampiezza delle zone stazionarie, sono legati a cinque parametri iniziali: il tasso eruttivo F ; la pendenza del substrato a ; la viscosità h ; la soglia di snervamento s_0 ed il peso specifico $g \cdot \rho$, indicando con g l'accelerazione gravitazionale e con ρ la densità. Lo spessore critico d_c che deve essere superato affinché la sostanza fluisca, è dato dalla seguente relazione:

$$d_c = \frac{s_0}{g \cdot \rho \cdot a} \quad (3.4)$$

Dalla relazione (3.4) si desume che, affinché la colata fluisca più facilmente, ovvero affinché il valore dello spessore critico da raggiungere perché essa si metta in moto sia basso, si deve avere un valore della soglia di snervamento basso e/o un valore della densità e della pendenza del substrato alto.

Da questa relazione, viscosità e tasso eruttivo si direbbe che non giochino alcun ruolo nel determinare il rapporto d'aspetto di una colata, ma in realtà essi sono presenti significativamente in quanto entrambi hanno forte influenza sul valore della soglia di snervamento. Infatti, essa è dipendente dalla viscosità, che a sua volta è funzione della temperatura che, come abbiamo visto, a livello di gradiente di abbassamento, dipende dal tasso eruttivo.

La pendenza della superficie di scorrimento influenza la forma di una colata nel senso che quanto più ripido è il pendio, tanto più stretta sarà la colata, ma, in generale, la pendenza potrà avere maggiore influenza sulle caratteristiche del flusso, influenzandone le strutture superficiali.

Una quantità finita di lava fusa costituisce quella che viene definita un'unità di flusso, tale lava viene emessa con continuità da un centro eruttivo, e mantenendosi fusa per tutto il percorso segue, per gravità, i fianchi del vulcano da cui è stata emessa. Un'unità di flusso si forma attraverso una prima fase detta di sviluppo, durante la quale la colata è continuamente rifornita di lava dalla sorgente, ed una seconda fase, detta di collasso, in cui l'evento eruttivo è terminato, ma il materiale fuso rimasto nel canale continua a scorrere per gravità verso il fronte, lasciandosi alle spalle il materiale freddo.

Per capire meglio come si presenta un'unità di flusso, se ne descrive una sezione verticale, ed una longitudinale. In sezione verticale, dalla parte superiore a quella inferiore, presenta una superficie ricoperta di detrito, una crosta vescicolata, una parte centrale omogenea ed una parte basale formata anch'essa da detriti. Longitudinalmente, comprende un canale ed un fronte, a sua volta, il canale può essere suddiviso in una zona entro cui la lava continua a scorrere, detto canale vero e proprio, ed una zona con argini laterali costruiti dall'avanzare del fronte.

Il percorso effettuato dalla lava consiste in un movimento dal cratere al canale, dal canale al fronte e dal fronte agli argini. In particolare, è possibile ricostruire il movimento della lava osservando l'unità di flusso sia trasversalmente alla direzione del flusso che dall'alto. Trasversalmente, la lava giunta al fronte dopo aver percorso il canale, trovandosi in superficie, solidifica e cade verso il basso per formare il detrito basale dell'unità di flusso, quindi nella parete superiore della colata si incontra lava sempre più giovane procedendo dal fronte verso il cratere, mentre inferiormente si incontra lava sempre più recente procedendo dal cratere verso il fronte.

Osservando l'unità di flusso dall'alto, la lava emessa, effettuato un certo percorso e giunta al fronte, dopo essersi solidificata, cade verso il basso per formare gli argini dell'unità di flusso, nella parte interna del canale vero e proprio si incontra la lava sempre più giovane procedendo dal fronte al cratere, mentre agli argini si incontra lava sempre più giovane spostandosi dal cratere al fronte (Borgia e Linneman, 1990).

Durante la fase di collasso si ha una diminuzione di velocità dato che la lava si sposta dal canale vero e proprio al fronte solidificato e si trova priva della spinta che nella fase di sviluppo riceveva dall'apporto di ulteriore materiale fuso emesso dal cratere, infine, la velocità si annulla del tutto quando tutta la lava passa dal canale al fronte dove è destinata a raffreddarsi e quindi solidificare.

La lunghezza finale di una colata dipende essenzialmente dal volume e dalla durata dell'alimentazione alla bocca (Borgia, Linneman, 1990). In alcuni casi è possibile prevedere tale lunghezza ed il suo tempo di allungamento, ai fini di tale valutazione è importante dividere la fase di scorrimento in tre stadi: il primo consiste in un rapido allungamento, il secondo rappresenta una fase di decelerazione ed il terzo coincide con una velocità di avanzamento molto

bassa. È però durante il primo stadio che la colata compie la maggior parte del suo percorso (Kilburn e Guest, 1993; Kilburn et al., 1995).

La capacità di movimento di un flusso di lava dipende essenzialmente dalla dinamica del fronte. La crosta del fronte si rompe di continuo durante lo scorrimento e le fratture espongono al raffreddamento nuove porzioni di magma. Pertanto, la quantità e la velocità con cui si solidifica parte della colata dipende dalla capacità di autobrecciatura della superficie. Il materiale al fronte continua a cadere, e quindi il fronte continua ad avanzare, fino a quando le forze di deformazione, ovvero la forza peso della crosta nel senso della corrente (W) e la spinta della parte di lava ancora fusa (P) aumentano con la stessa velocità con cui aumenta la resistenza tensile indotta dal raffreddamento della parte al fronte (R), secondo la seguente relazione:

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dP}{dt} = \frac{dR}{dt} \quad (3.5)$$

I tre stadi attraversati dalla colata durante il suo scorrimento possono essere spiegati se si osserva che: nel primo stadio (fase in cui la colata subisce un rapido allungamento), la lava non ha il tempo di solidificare, perché la spinta del nucleo ancora caldo è tanto forte da rendere significativo l'effetto del peso della lava al fronte; nel secondo stadio (fase in cui la velocità del fronte diminuisce all'avanzare del flusso), ad un tempo t' dall'inizio del processo, il peso della crosta e la spinta del nucleo diventano equivalenti alla velocità con cui si frattura la superficie; nel terzo stadio (fase in cui il flusso rallenterà ulteriormente fino ad arrestarsi completamente), ad un tempo maggiore di t' , la spinta del nucleo diventa tanto piccola da non indurre alcuna sollecitazione sulla crosta. La lunghezza percorsa durante il primo stadio è associata a valori di W/P inferiori o uguali ad 1 (Kilburn et al., 1995).

La soluzione dell'equazione precedente, per valori di $W/P \leq 1$, si ottiene sotto le seguenti condizioni:

- la crosta è molto più sottile del nucleo interno caldo;
- lo spessore della crosta è limitato dalla sua conduttività;
- la crosta si frattura elasticamente ad una velocità controllata dallo stiramento della superficie nel senso della corrente;
- il fronte è molto più ampio che alto;

- lo spessore del fronte aumenta con una legge di potenza in funzione del tempo;
- nel fronte non sono importanti le forze inerziali;
- le variazioni di pendenza del substrato sono troppo piccole per avere influenza sulla quantità di moto del fronte.

I risultati analitici indicano che t' non può superare un tempo $t^*[s]$, dato da:

$$t^* = 1.2 \left(\frac{\lambda^2}{x} \right)^{\frac{1}{2}} t_{ch}^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

durante il quale il flusso può raggiungere una lunghezza massima di L^* [km]:

$$L^* = 1.8 \lambda^2 (x \cdot t_{ch})^{1/2} \quad (3.7)$$

dove: x è la diffusività termica della lava ($5 \times 10^{-7} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$); t_{ch} è la scala di tempo per il congelamento della superficie (150s per il basalto); e λ lo spessore massimo crostale per una continua fatturazione della crosta, esprimibile attraverso la seguente relazione:

$$\lambda = \frac{\varepsilon \cdot S}{\rho \cdot g \cdot \sin \beta} \quad (3.8)$$

dove: ε e S rappresentano, rispettivamente, l'estensione delle fratture e lo sforzo tensile della crosta solida; ρ è la densità della lava (2200kgm^{-3} , con una vescicolazione intorno al 10-15%); g è l'accelerazione di gravità; e β è l'angolo di inclinazione del substrato rispetto all'orizzontale. Il valore di $\varepsilon \cdot \beta$ è di circa $2 \times 10^4 \text{Pa}$ ed è circa uguale a $1/\sin \beta$ (Kilburn et al., 1995).

Questo metodo può essere un buon strumento di previsione, in quanto permette di stimare la lunghezza di un flusso ed il tempo di allungamento sul terreno di una colata.

A seconda che un flusso lavico venga eruttato in ambiente subaereo o subacqueo, e a seconda della sua composizione chimica, il suo aspetto morfologico avrà differenti caratteristiche. Colate subaeree di lava basica possono formarsi in seguito alla fuoriuscita di magma come un continuo

liquido da bocche centrali o fessurali, al trabocco di un lago di lava, oppure alla ricomposizione di un flusso continuo dalla abbondante ricaduta di brandelli lavici ancora fusi a seguito di attività di fontana di lava.

Due tipi morfologici estremi di colata basica possono sostanzialmente essere distinti: colate di tipo *pahoehoe* e colate di tipo *aa*. In ambiente subacqueo, invece, il processo eruttivo più tipico per magmi a composizione basica consiste nella formazione delle lave a cuscino (Figura 3.3).



Figura 3. 3. Tipologie di lave: a) lava *pahoehoe*; b) lava *aa*; c) lava a cuscino. (Osservatorio Vesuviano, 2010).

Le lave *pahoehoe* (dall’hawaiano, “dove si può camminare a piedi nudi”) sono lave con superficie liscia, ondulata e ricoperta da un sottile strato di vetro vulcanico; talvolta sono anche dette lave a corda, perché la loro forma richiama quello di una corda. Questo aspetto particolare è dovuto al fatto che la lava, molto fluida, solidifica prima in superficie, mentre al di sotto essa continua a scorrere velocemente, favorendo la formazione di ondulazioni in superficie.

Le lave *aa* (dall’hawaiano, “su cui non si può camminare a piedi nudi”) presentano una superficie irregolare. I magmi da cui derivano sono più viscosi di quelli delle lave *pahoehoe*. Durante il raffreddamento della lava, si forma una rigida crosta superficiale, che si frattura e si rompe in blocchi (perciò sono dette anche lave a blocchi), a causa del movimento della lava sottostante, ancora fluida.

Le lave a cuscino (o *pillow lavas*) sono così chiamate perché assumono l’aspetto di blocchi arrotondati. Si formano in ambiente sottomarino, in corrispondenza delle dorsali oceaniche, quando la lava, appena fuoriuscita, scivola lungo superfici inclinate: la superficie si raffredda rapidamente, per contatto con l’acqua, e assume un aspetto vetroso, mentre l’interno si raffredda più lentamente.

3.2.2. Azione ed effetti sul costruito

L'azione prodotta da un flusso lavico su una costruzione può essere assimilata ad una pressione statica orizzontale uniforme q_H (Figura 3.4), pari a.

$$q_H = \rho gh \quad (3.9)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità ($9,81\text{m/s}^2$), h è l'altezza del fronte lavico (m) e ρ è la densità (kg/m^3) del flusso che, a pressione atmosferica, è compresa tra 2300 e 2700kgm^{-3} .

La pressione q_H è accompagnata da temperature molto elevate ($700\text{-}1200^\circ\text{C}$) che, oltre a generare distorsioni termiche, sono responsabili del degrado delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

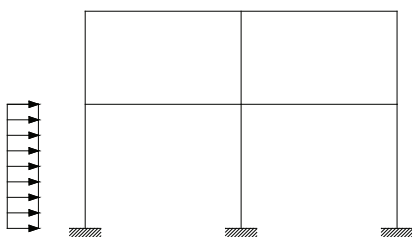


Figura 3. 4. Schema dell'azione prodotta da un flusso lavico sulla struttura investita.

Le passate eruzioni mostrano come, nella maggior parte dei casi, il destino di una struttura investita da un flusso lavico sia inesorabile. Ciò a causa della pressione agente, specie per notevoli altezze del fronte lavico, ma soprattutto del deterioramento termico dei materiali e dei possibili incendi lava- indotti. Fortunatamente, però, le velocità di scorrimento delle lave sono generalmente di qualche chilometro all'ora e, dunque, il rischio può essere ridotto deviando, contenendo, raffreddando o interrompendo i flussi.

A titolo di esempio, nelle Figure 3.5 e 3.6 sono riportate alcune immagini di danni prodotti da flussi lavici nel caso delle eruzioni, rispettivamente, del vulcano Kilauea (Hawaii) e dell'Etna (Italia).



Figura 3. 5. Eruzioni del vulcano *Kilauea* (Hawaii): a) 21 giugno 1989, la lava raggiunge il National Park Service Visitor Center Wahaula; b) 22 giugno 1989 il Visitor Center è distrutto; c) 21 febbraio 1990, la lava invade l'Highway 130 di Kalapana; d) 3 maggio 1990, la lava muove verso i Giardini di Kalapana; e) 23 aprile 1990, Walter's Kalapana Store and Drive Inn (W'sKSDI); f) 6 giugno 1990, W'sKSDI; g) 13 giugno 1990, W'sKSDI; h) 15 febbraio 1991, la lava ha attraversato la città di Kalapana e raggiunge il mare. (USGS, 2010).

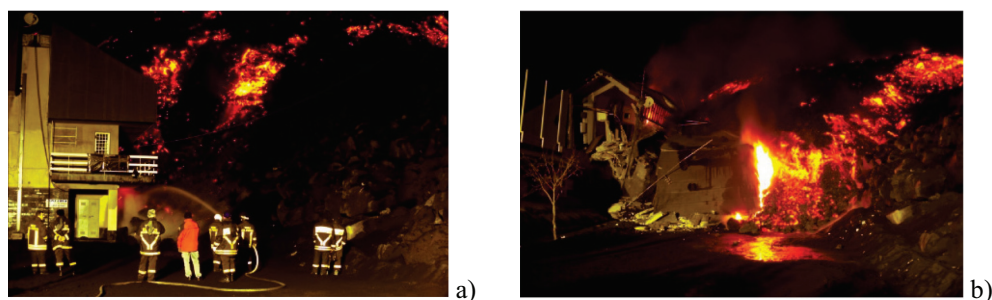


Figura 3. 6. Etna, eruzione del 16 dicembre 2002. La lava investe il *Rifugio Sapienza*:
a) 20:00; b) 22:00. (Alean et al., 2010).

3.3. I DEPOSITI DA CADUTA

3.3.1. *Fenomeno*

I depositi da caduta aerea sono formati dall'accrescimento dei clasti che cadono per gravità da una colonna eruttiva. La distanza a cui cadono dipende dalla velocità e dall'angolo iniziale di espulsione. I piroclasti più grandi cadono nei dintorni del punto di emissione, quelli più frammentati ad una distanza maggiore, mentre la frazione di dimensioni più ridotte, per effetto dei venti stratosferici, può essere trasportata ad una grandissima distanza dalla bocca. Quindi, con l'aumentare della distanza dal vulcano in eruzione, i depositi sono costituiti da particelle sempre più piccole e sottili.

Generalmente, i depositi da caduta aerea ricoprono la topografia con uno strato di spessore uniforme (Figura 3.7), ma, trattandosi di materiali con una consistenza molto ridotta, può essere facilmente accumulato nelle zone del territorio più depresse.

Durante violente eruzioni esplosive, come quelle Pliniane e sub-Pliniane, grandi depositi di pomici ricoprono un'area, intorno al cratere, di forma ellittica che risulta allungata in direzione del vento (Figura 3.8a-d). Eruzioni esplosive moderate, invece, producono depositi di clasti, la cui distribuzione è simmetrica intorno al cratere (Figura 3.8e-f), dal momento che il materiale non viene lanciato ad un'altezza sufficiente per essere trasportato dal vento.

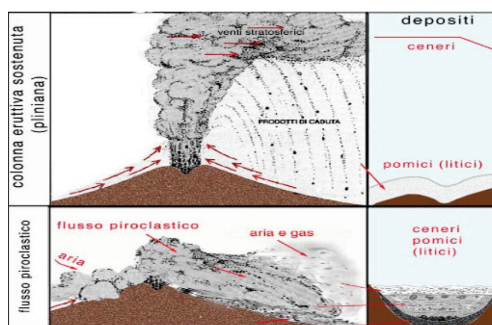


Figura 3. 7. Depósitos da caduta (GNV, 2010)

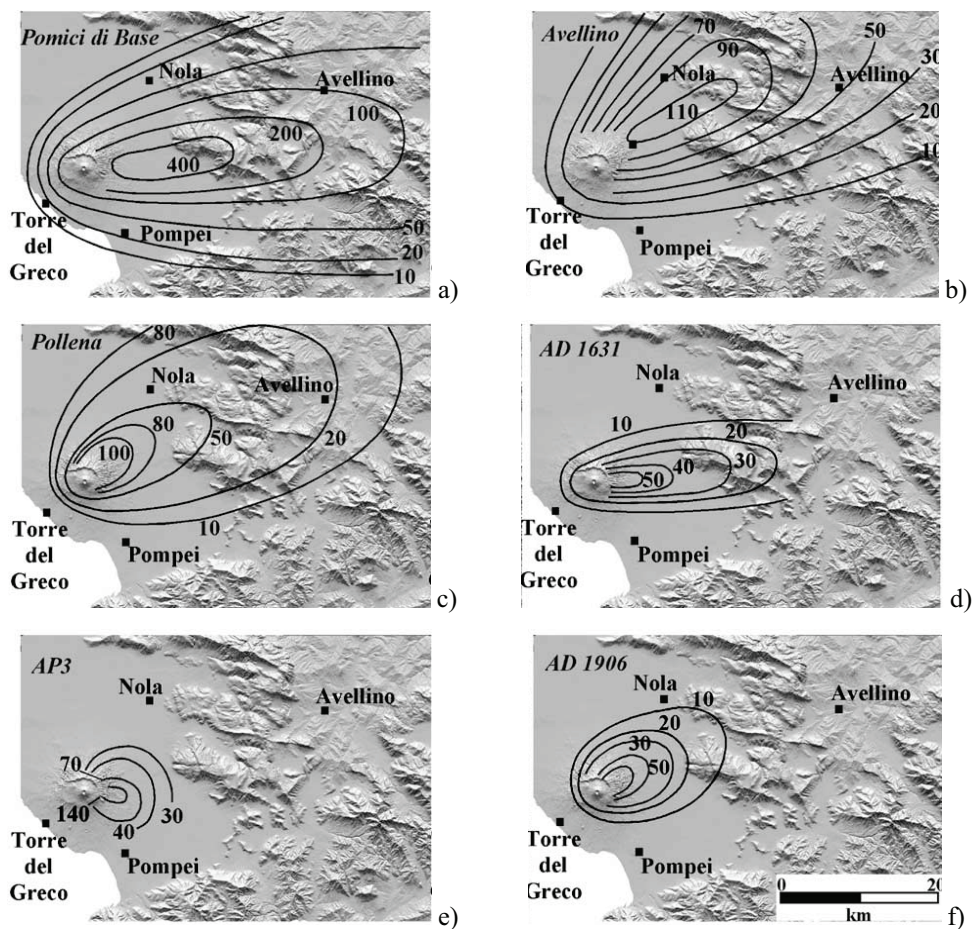


Figura 3. 8. Mappe delle isopache (in cm) di alcune eruzioni Vesuviane: a) Pomici di Base, 18300 \pm 180BP; b) Avellino, 3960 \pm 60BP; c) Pollena, 472dC; d) 1631dC; e) AP3, 2710 \pm 60BP; f) 1906dC. (Raffaele Cioni et al., 2003) - BP= Before present-.

Oltre che dallo spessore dello strato, la pericolosità del deposito dipende anche dalla sua densità. Essa è funzione della composizione (in particolare dalle proporzioni di solido e particelle vescicolari), del grado di compattezza e dell'umidità del deposito oltre che dal verificarsi di piogge susseguenti. Dunque, la densità cambia con le condizioni climatiche: in condizioni asciutte è compresa tra 400 e 1600 kg/m³, in funzione della compattezza; mentre, in condizioni umide, è compresa tra 800 e 2000 kg/m³ (Spence et al., 2005).

A tal proposito, in Tabella 3.1 si riportano le principali caratteristiche dei 24 maggiori eventi vulcanici vesuviani, indicando, oltre all'indice di esplosività VEI, l'altezza H della colonna pliniana, l'estensione A dell'area inclusa nell'isopaca di 10 cm, il volume V dei piroclasti espulsi e la densità ρ degli stessi (Cioni et al., 2003).

Tabella 3. 1. Principali caratteristiche di alcuni eventi avvenuti al Vesuvio.
(Cioni et al., 2003).

ERUZIONE	VEI	H, [km]	A [km ²]	V [x10 ⁶ m ³]	ρ [kg/m ³]
1944 dC	3	4	270	110	1200
1906 dC	3	13	210	80	1100
1631 dC	5	19	300	210	1000
PM6	3	-	35	10	900
PM5	3	-			
PM4	3	-	60	100	900
PM3	3	-			
PM2	3	10	65	40	900
PM1	4	14	210	90	900
Pollena, 472dC	5	-	1000	420	900
A.D. 79-472	3	-	150	150	900
Pompeii W	6	26	1540	1100	500
Pompeii G	6	32	3430	1800	1000
AP5	4	-	180	80	1500
AP4	4	-	280	120	1300
AP3	4	15	350	150	1500
AP2	4-5	20	400	170	1500
AP1	4-5	-	300	150	1500
Avellino W	5	23	585	320	400
Avellino G	6	31	2420	1250	800
Mercato	6	22	2150	1400	600
Verdoline	5	20	885	430	1000
Pomici di Base	6	-	2920	4400	900

3.3.2. Azione ed effetti sul costruito

La composizione, lo spessore, la densità e la distribuzione di taglia delle particelle del deposito, dipendono da fattori riferiti alla specifica natura dell'eruzione vulcanica, quali stile dell'eruzione e altezza della colonna. Ovviamente delle variazioni esistono da vulcano a vulcano. Cambiamenti importanti di questi parametri sono anche possibili all'interno del deposito di un'unica eruzione, vista l'influenza delle dinamiche delle diverse particelle e del tempo, specialmente vento e precipitazioni.

In alcuni casi, comunque, ad una decina di chilometri dalla fonte, cadute di *tephra* possono accumularsi con profondità sufficiente a provocare crollo di tetti. Sotto depositi da caduta, oltre alle coperture, possono subire collasso colonne, muri o fondazioni. Ciò può essere dovuto ad un incremento dei carichi verticali. Più comunemente, però, la crisi della struttura verticale è la conseguenza dell'iniziale crollo del tetto o del carico orizzontale da cenere che si raccoglie contro i muri (Figure 3.9).



Figura 3. 9. Vulcano Pinatubo, Philippines. Eruzione del 1991. I depositi da caduta producono il collasso di alcune coperture e di intere strutture (USGS, 2010).

Allo scopo di valutare l'effetto della caduta di *tephra* in copertura, è indispensabile determinare il carico per unità di superficie al suolo. Esso può ritenersi pari ad una pressione statica verticale uniforme data dal seguente prodotto (Figura 3.10):

$$q_v = \rho gh \quad (3.10)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità ($9,81\text{m/s}^2$), h è lo spessore (m) e ρ è la densità (kg/m^3) del deposito.

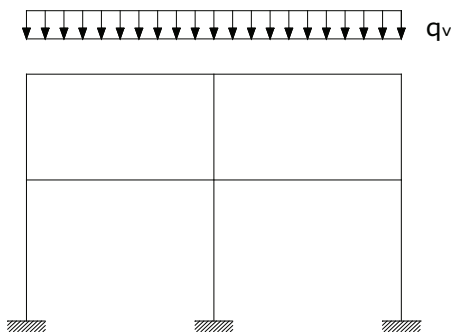


Figura 3. 10. Schematizzazione del carico dovuto ai depositi da caduta.

C'è da dire, però, che anche se i carichi da *tephra* a terra sono noti o possono essere dedotti da una mappa delle isopache, il massimo carico prodotto in copertura può essere diverso per molte ragioni.

L'accumulazione piroclastica, infatti, potrebbe scivolare da un tetto inclinato, essere più o meno umida in relazione alle capacità di smaltimento idrico del tetto, muoversi, accumulandosi su alcune parti del tetto più che su altre, oppure essere soffiata via da venti o pioggia.

Alcuni aspetti dell'azione da *tephra*, come caduta del carico da tetti molto inclinati o l'accumulazione in scavi o contro muri, sono gli stessi dell'azione da neve, dunque, il carico statico da *tephra* può essere considerato un carico gravitazionale distribuito, simile a quello da neve. Secondo le attuali norme italiane, l'azione da neve, può raggiungere $3\div 4\text{kPa}$, nel caso delle regioni settentrionale, mentre per l'area napoletana non si supera $1,0\text{kPa}$. Addirittura, nel caso in cui il carico da neve sia trascurabile e le coperture siano dimensionate rispetto alle pressioni da vento o in relazione al grado di accesso

delle persone, fosse soltanto per manutenzione periodica, il carico minimo imposto è 0,5kPa, con valori più alti se il tetto è piano e/o per accesso normale o deposito. Ovviamente, ogni progetto presenta una certa riserva di sicurezza rispetto al valore dei carichi da norma, ma il superamento di questa soglia causerà probabilmente il crollo del tetto, di una sua parte o dell'intero edificio.

In analogia con la schematizzazione del carico da neve, per la determinazione dell'azione esercitata da un deposito piroclastico in copertura, si è proposto un approccio del tutto analogo a quello utilizzato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) del 2008 (De Gregorio, et al., 2010a). In particolare, il carico in copertura q_S è valutabile attraverso la seguente espressione:

$$q_S = \mu_1 \cdot q_v \cdot C_E \quad (3.11)$$

dove: μ_1 è il coefficiente di forma della copertura; q_v è il valore caratteristico di riferimento del carico *tephra* al suolo [kN/m²] fornito dalla relazione (3.9) con riferimento alle isopache delle eruzioni passate; e C_E è il coefficiente di esposizione.

Si ipotizza che il carico agisca in direzione verticale e lo si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

I valori del coefficiente di forma μ_1 sono riportati in Tabella 3.2. Essi si riferiscono a coperture ad una o due falde. L'angolo formato dalla falda con l'orizzontale, indicato con α , è espresso in gradi sessagesimali.

Tabella 3. 2. Valori del coefficiente di forma μ_1 (NTC, 2008).

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

In generale, devono essere considerate le due seguenti principali disposizioni di carico:

- carico da *tephra* depositato in assenza di vento;
- carico da *tephra* depositato in presenza di vento.

Per le coperture ad una falda, si assume che il deposito non sia impedito di scivolare. Se l'estremità più bassa della falda termina con un parapetto, una barriera od altre ostruzioni, allora il coefficiente di forma non potrà essere

assunto inferiore a 0,8 indipendentemente dall'angolo α . Va considerata la condizione riportata in Figura 3.11a la quale deve essere utilizzata sia in assenza che in presenza di vento.

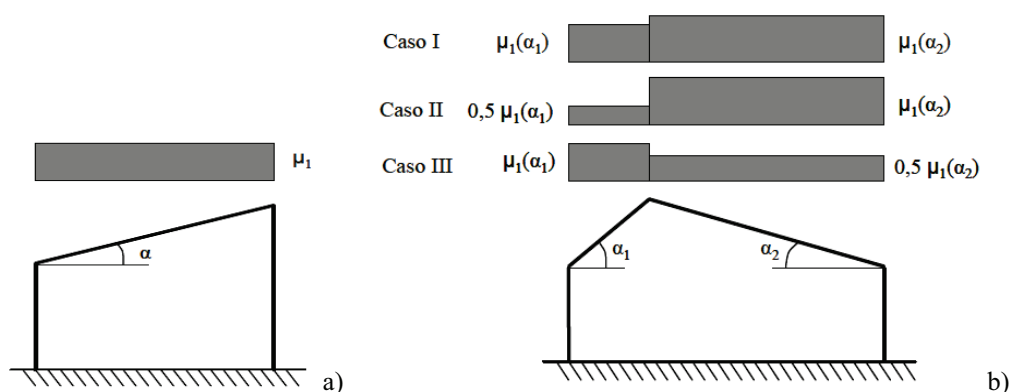


Figura 3. 11. Condizioni di carico per coperture: a) ad una falda, b) a due falde (NTC, 2008).

Nel caso di coperture a due falde, si assume ancora che il deposito non sia impedito di scivolare. Se l'estremità più bassa della falda termina con un parapetto, una barriera od altre ostruzioni, allora il coefficiente di forma non potrà essere assunto inferiore a 0,8 indipendentemente dall'angolo α .

Per il caso di carico da *tephra* senza vento, però, si deve considerare la condizione denominata Caso I di Figura 3.11b, mentre, per il caso di carico da *tephra* con vento, si deve considerare la peggiore tra le condizioni denominate Caso II e Caso III di Figura 3.11b.

Il coefficiente di esposizione C_E può essere utilizzato per modificare il valore del carico da *tephra* in copertura, in funzione delle caratteristiche specifiche dell'area in cui sorge l'opera. Valori consigliati del coefficiente di esposizione per diverse classi di topografia sono forniti in Tabella 3.3.

E' importante osservare che i depositi piroclastici, oltre a produrre un sovraccarico q_S , esercitano sulle strutture investite un ulteriore aggravio, dovuto alle temperature in atto comprese tra i 150 e 350°C (Giurioli et al., 2008), responsabili di sostanziale degrado delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Tabella 3. 3. Valori del coefficiente di esposizione C_E (NTC, 2008).

Topografia	Descrizione	C_E
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti.	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di carico sulla costruzione	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

3.4. I FLUSSI PIROCLASTICI E I SURGES

3.4.1. Fenomeno

Le correnti piroclastiche sono miscele di gas e particelle solide, contenute in percentuali variabili, che scorrono al suolo sotto l'effetto della gravità, a seguito di un primo impulso dovuto ad un'esplosione direzionale o al collasso di una colonna eruttiva. Sia che tali correnti piroclastiche siano ad alta concentrazione di particelle, poco espanse e caratterizzate da moto laminare (*flussi piroclastici* propriamente detti o *Pyroclastic Density Current, PDC*), sia che esse siano diluite espanse e turbolente (*surges*), la loro mobilità è sempre molto elevata e il loro potere distruttivo è devastante (Figura 3.12). Queste nubi di particelle e gas sono capaci di fluire giù dai pendii come una valanga di neve e di raggiungere notevoli distanze dal punto di emissione, con velocità che possono facilmente superare i 100km/h ($\sim 30\text{m/s}$), con temperature anche maggiori di 500°C

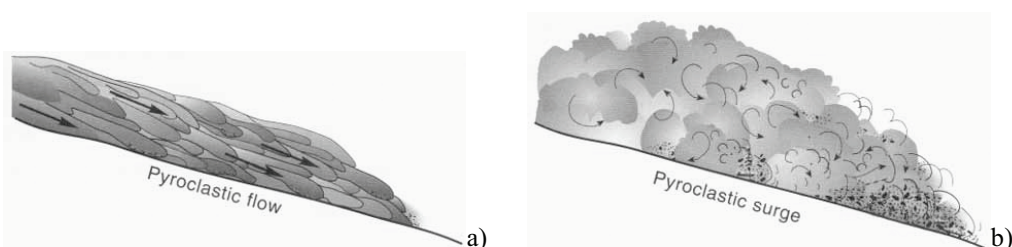


Figura 3. 12. Schematizzazione del moto laminare di un flusso piroclastico (a) e del moto turbolento di un surge (b). (Texas Bureau of Economic Geology, 2009).

I danni da flussi piroclastici e surges, secondi soltanto ai depositi da caduta, sono associati alle elevate temperature, alla pressione dinamica (funzione della densità) ed alla velocità. Le correnti piroclastiche possono abbattere ed incenerire qualsiasi tipo di ostacolo fino a distanze di alcuni chilometri dal centro di emissione. I depositi ad esse connessi possono avere anche considerevole spessore e quindi causare danni per seppellimento. La parte della corrente a pressione dinamica e velocità ridotta è in grado di penetrare all'interno di un edificio, attraverso rottura delle aperture, ed il conseguente ingresso di cenere può provocare combustione di elementi infiammabili come i mobili. La porzione della corrente più veloce e a maggiore pressione dinamica, invece, può essere in grado di mettere in volo “missili” di ogni genere (particelle, frammenti, pietre, cassonetti, automobili, ecc.) aumentando notevolmente l'impatto distruttivo.

Inoltre, a causa delle ceneri più fini, che tendono ad essere allontanate dalla corrente piroclastica durante il suo cammino e nel momento in cui si arresta, i flussi piroclastici possono causare rapida perdita della vita per inalazione e/o scottature. Si pensi, infatti, che gli esseri umani sopravvivono per meno di 15 minuti a temperature tra i 150 ed i 200°C e per meno di 5 minuti a temperature che eccedono 250°C.

Un flusso piroclastico essendo costituito da una miscela di gas con dispersione di particelle solide di varie dimensioni, ben risponde al modello fisico di mezzo multi- fase.

Allo scopo di esaminare l'evoluzione dei flussi piroclastici vesuviani, Todesco et al. (2002) hanno adottato un modello basato sulla soluzione delle equazioni di Navier-Stokes generalizzate per una miscela multi- fase. Nel dettaglio, il magma è rappresentato come una miscela bi- fasica, costituita da una porzione omogenea allo stato fuso (magma e cristalli) e da una porzione gassosa (vapore acqueo). Il modello risolve tre equazioni di conservazione della massa per gli stati gas, liquido e solido e due equazioni di conservazione della quantità di moto per il sistema magma liquido + miscela di cristalli e gas. Inoltre, le equazioni costitutive descrivono la resistenza all'interfaccia tra le fasi e l'attrito tra il magma e la parete del condotto.

Questo modello è stato applicato al vulcano Vesuvio (Esposti Ongaro et al., 2002), che è stato schematizzato come simmetrico, rispetto all'asse verticale del condotto vulcanico. Le simulazioni sono riferite a due diverse sezioni del

vulcano, individuate attraverso i profili topografici del versante sud (settore A) e del versante nord (Settore B) del vulcano (Figura 3.13). Quest'ultimo caratterizzato dalla presenza del rilievo del Monte Somma.

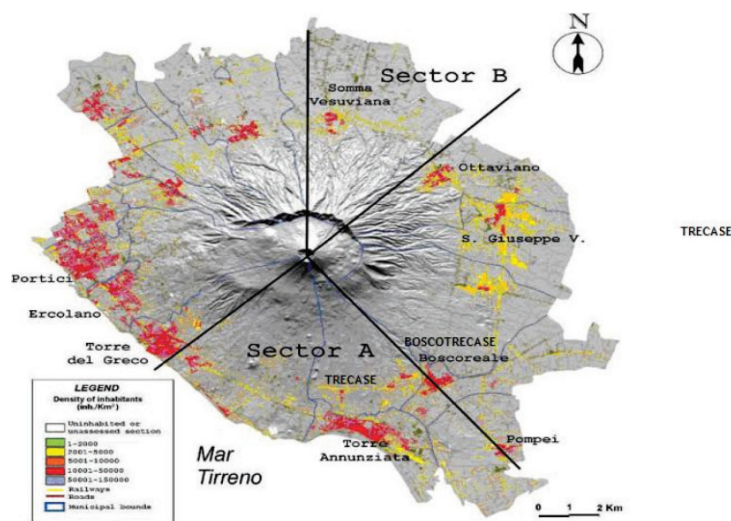


Figura 3. 13. L'area vesuviana e i suoi insediamenti urbani. I settori A e B indicano i versanti rappresentati dai due profili topografici considerati nelle simulazioni (Todesco et al., 2002).

Tra le simulazioni effettuate, quella più sfavorevole si riferisce ad un evento vesuviano di tipo sub-pliniano, caratterizzato da una massa eruttiva di $5 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$. Allo scopo di escludere le turbolenze generate dai flussi a contatto con gli insediamenti urbani, i valori delle pressioni sono valutati in atmosfera indisturbata, a 5 e 15m dal piano campagna. In Figura 3.14, con riferimento al settore A del Vesuvio, sono riportati i picchi delle pressioni dinamiche esercitate da un flusso con un contenuto totale di acqua (w) pari al 2% ed una temperatura (T) del magma all'uscita dal cratere pari a 950°C .

La pressione è una funzione della distanza radiale dal cratere. I valori di picco sono fortemente influenzati dall'angolo α di propagazione del flusso. Per la simulazione con α pari a 90° (Figura 3.14a), i valori massimi di pressione dinamica sono 10kPa a 2km dal cratere, 2kPa a 3,5 km e circa 1-2kPa per distanze superiori. Nei casi in cui l'angolo di diffusione vale 180° e 360° (Figura 3.14b-c), i valori massimi delle pressioni, a 2 km dal cratere, valgono circa 3 e 1.5kPa, rispettivamente, con valori inferiori a 1kPa per distanze superiori.

Le simulazioni relative al settore A, con angolo α pari a 90° , contenuto d'acqua w pari al 2% e temperatura T del magma all'uscita dal cratere pari 950°C (A90-W2-t950), hanno restituito le variazioni temporali (a partire dall'inizio dell'eruzione) di densità, velocità radiale e temperatura del flusso indicate in Figura 3.15, alle distanze di 2, 4, 7,5km dal cratere ed a 5m di altezza dal piano campagna. Per la medesima simulazione, i valori delle pressioni dinamiche ed isotrope, comparate con la pressione atmosferica sono indicate in Figura 3.16.

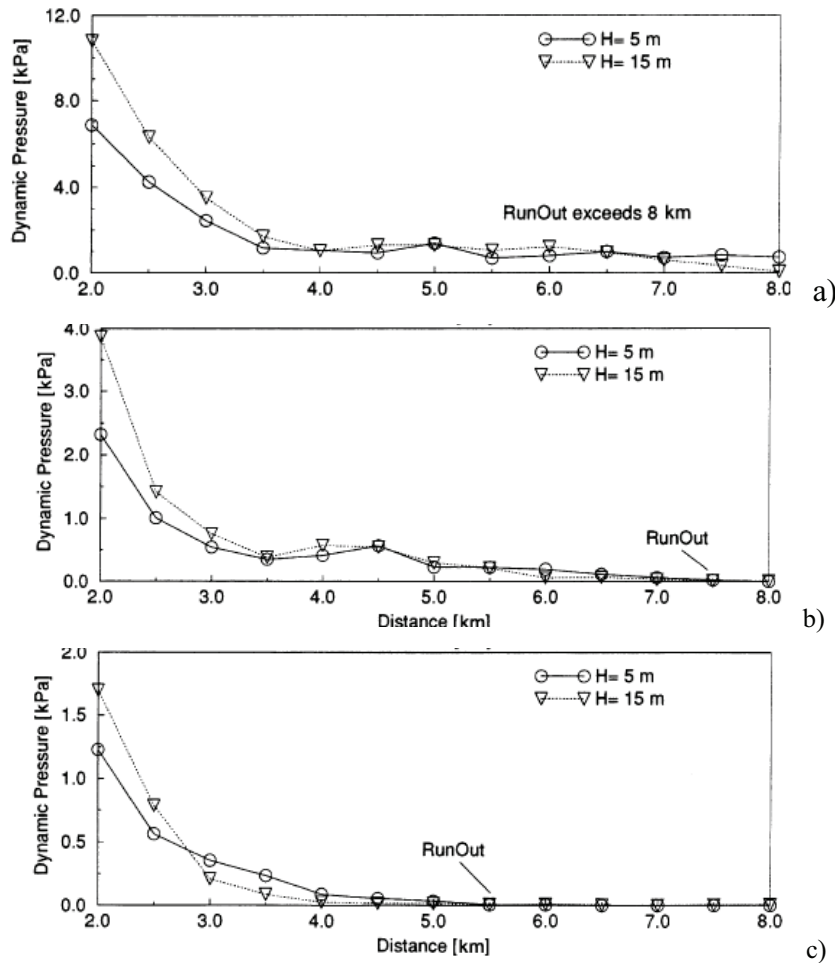


Figura 3. 14. Picchi delle pressioni dinamiche in funzione della distanza dal cratere, al variare dell'angolo α di propagazione dei flussi: a) $\alpha=90^\circ$; b) $\alpha=180^\circ$; c) $\alpha=360^\circ$ (Esposti Ongaro et al., 2002).

Le simulazioni relative al settore B, con angolo α pari a 90° , contenuto d'acqua w pari al 2% e temperatura T del magma all'uscita dal cratere pari 950°C (B90-W2-t950), hanno restituito le variazioni temporali (a partire dall'inizio dell'eruzione) di densità, velocità radiale e temperatura del flusso indicate in Figura 3.17, alle distanze di 2, 4, 7,5km dal cratere ed a 5m di altezza dal piano campagna. Per la medesima simulazione, i valori delle pressioni dinamiche ed isotrope, comparate con la pressione atmosferica sono indicate in Figura 3.18.

Dall'analisi dei risultati si evince come le temperature in atto siano letali per le persone che si trovino all'aperto. Ad esempio, nel settore meridionale A, ad una distanza di 7,5km dal cratere, le temperature dei flussi possono attestarsi intorno ai 400°C ; mentre nel settore settentrionale B, ad una distanza di 7,5km, le temperature possono raggiungere i 600°C e non scendere sotto i 200°C ad una distanza di 10km.

All'interno del progetto europeo EXPLORIS (EVR1-CT-2002-40026) il modello di simulazione delle PDCs illustrato è stato integrato, includendo gli effetti 3D della topografia del vulcano e della propagazione dei flussi (Esposti Ongaro et al., 2008). Le simulazioni condotte sono state cinque:

- SIM1: colonna convettiva, con massa eruttiva m' pari a $5 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$;
- SIM2: incipiente collasso della colonna, con $m' = 5 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$;
- SIM3: parziale collasso della colonna, con $m' = 5 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$;
- SIM4: totale collasso della colonna, con $m' = 5 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$;
- SIM5: collasso parziale della colonna, con $m' = 8 \times 10^7 \text{ kgs}^{-1}$.

In Figura 3.19 è riportata una mappa delle pressioni dinamiche massime raggiunte dal flusso piroclastico, nel caso di totale collasso della colonna pliniana (SIM4), in un'atmosfera indisturbata a 10m da terra, nell'intervallo temporale 0-900s.

I valori delle pressioni dinamiche finora indicati trascurano l'effetto delle turbolenze generate dall'interazione del flusso piroclastico con un insediamento urbano. Zuccaro e Ianniello (2004) esaminano il problema attraverso lo studio di un settore del comune di Torre del Greco, fianco sud-est del Vesuvio, investito da un flusso piroclastico con velocità di 20 ms^{-1} , densità di 10 kgm^{-3} e viscosità di $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. I risultati ottenuti evidenziano l'effetto barriera dei primi edifici investiti dal flusso nei riguardi di quelli retrostanti.

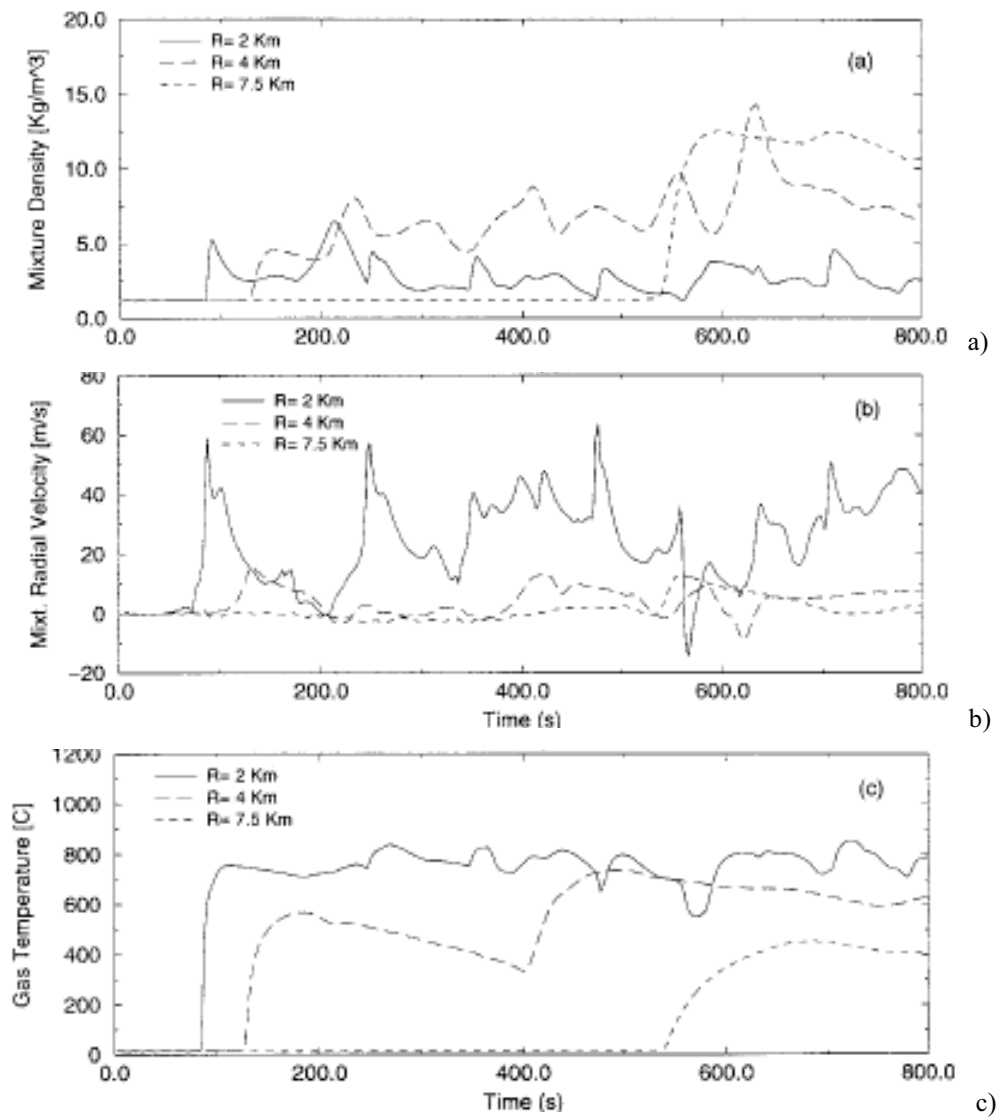


Figura 3.15. Simulazione A90-W2-t950, relativa al settore meridionale A. Valutazione fatta a diverse distanze dal cratere, a 5m dal suolo. *a)* Distribuzione di densità della miscela. *b)* Velocità radiale della miscela. *c)* Temperatura del gas (Esposti Ongaro et al., 2002).

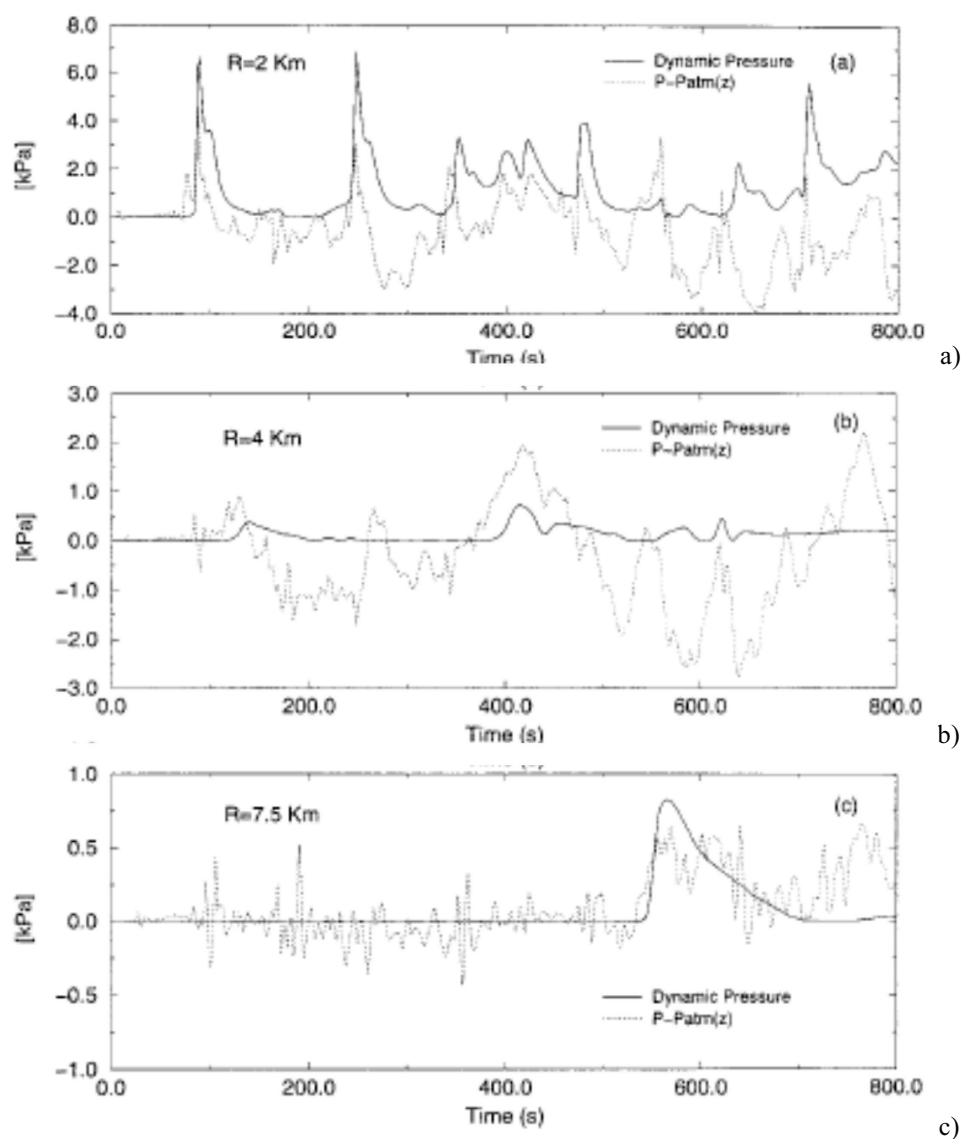


Figura 3. 16. Simulazione A90-W2-t950, relativa al settore meridionale A. Valutazione fatta a diverse distanze R dal cratere, a 5m dal suolo: a) R=2km; b) R=4km; c) R=7,5km (Esposti Ongaro et al., 2002).

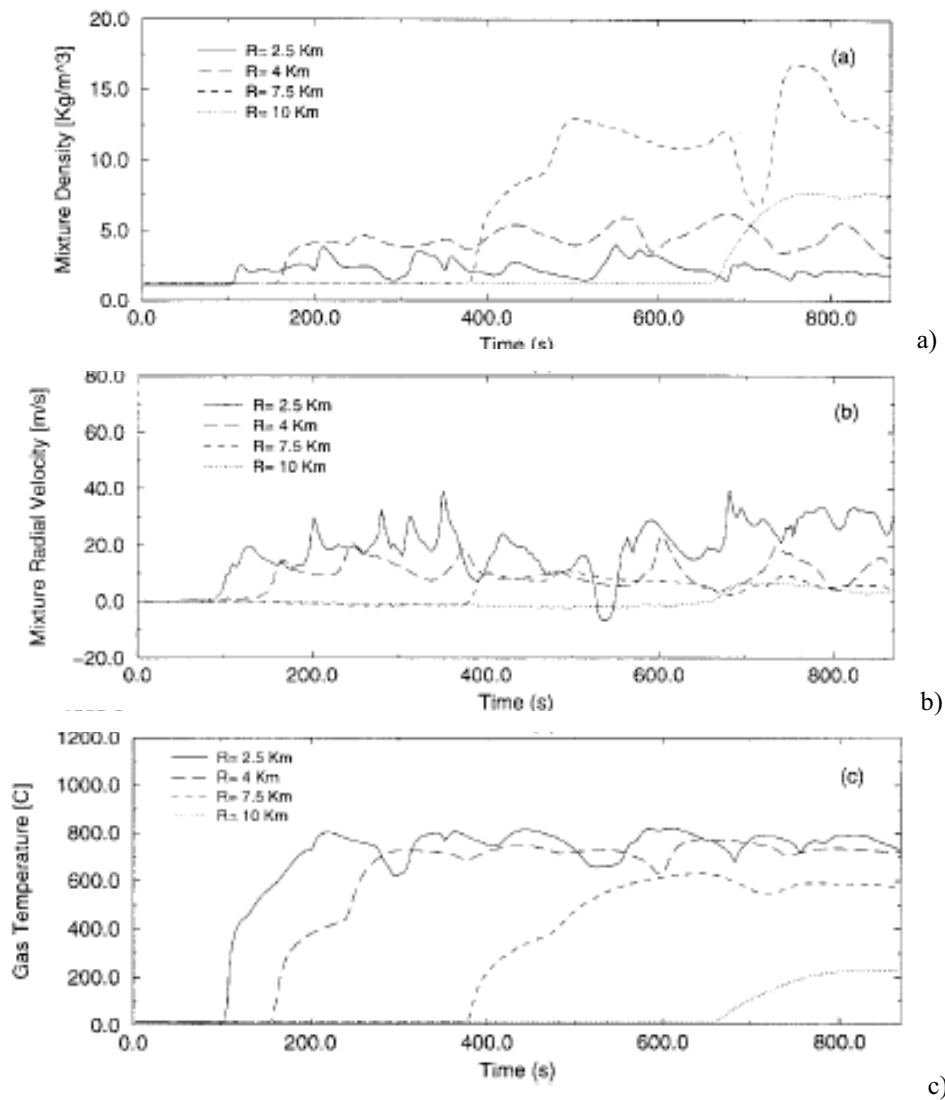


Figura 3. 17 Simulazione B90-W2-t950, relativa al settore settentrionale B. Valutazione fatta a diverse distanze dal cratere, a 5m dal suolo. *a)* Distribuzione di densità della miscela. *b)* Velocità radiale della miscela. *c)* Temperatura del gas. (Esposti Ongaro et al., 2002).

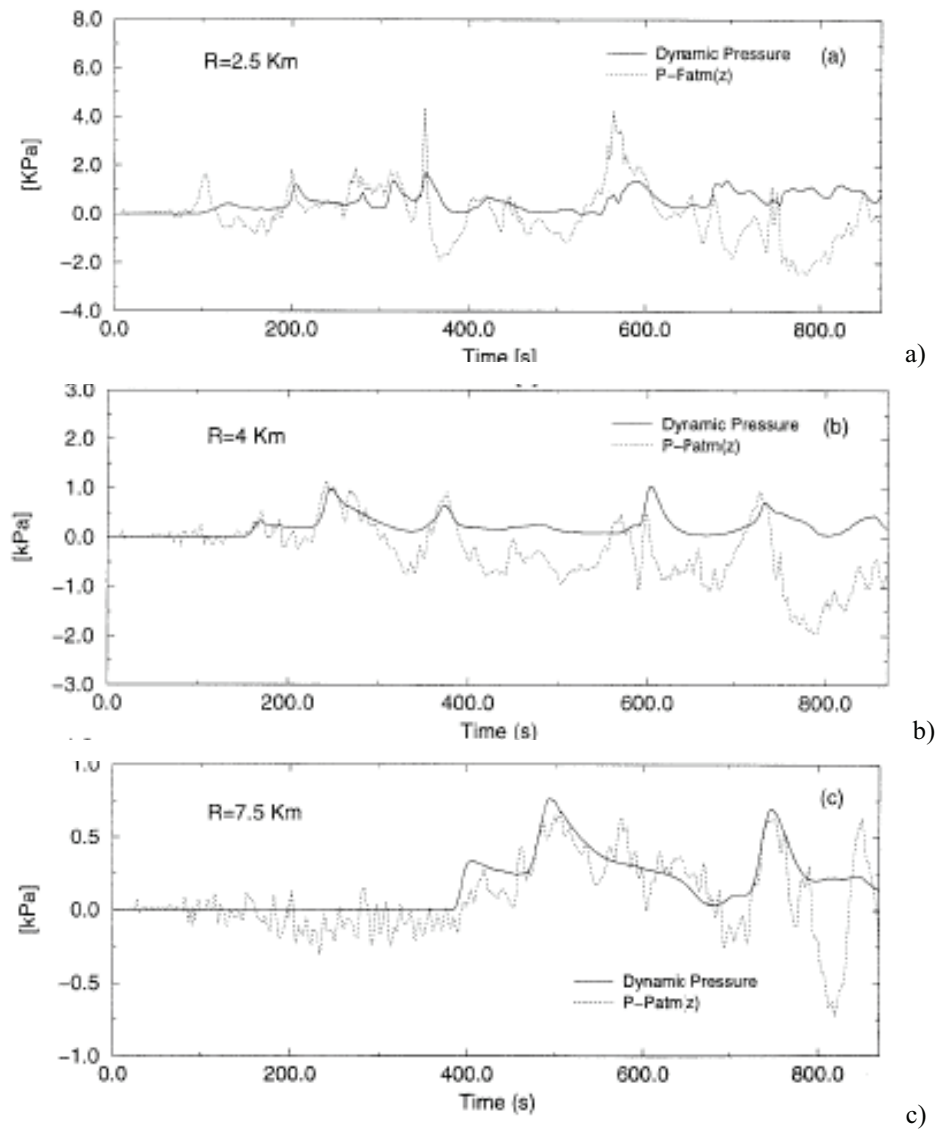


Figura 3. 18 Simulazione B90-W2-t950, relativa al settore settentrionale B. Valutazione fatta a diverse distanze R dal cratere, a 5m dal suolo: *a)* R=2km; *b)* R=4km; *c)* R=7,5km (Esposti Ongaro et al., 2002).

L'effetto barriera si è dimostrato in grado di produrre addirittura delle depressioni (Figura 3.20), con un coefficiente moltiplicativo delle pressioni compreso nell'intervallo $[-3; +2]$.

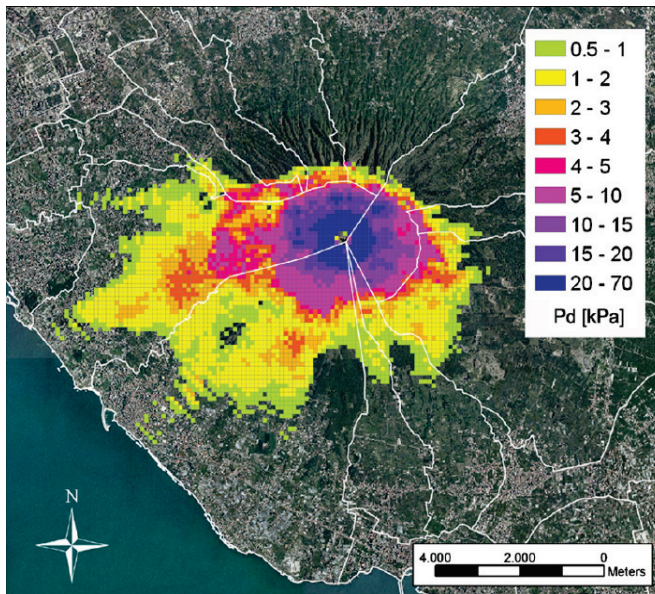


Figura 3. 19. Mappa delle pressioni dinamiche massime raggiunte dal flusso piroclastico, nel caso di totale collasso della colonna pliniana (SIM4), in un'atmosfera indisturbata a 10m da terra, nell'intervallo temporale 0-900s (Esposti Ongaro et al., 2008).

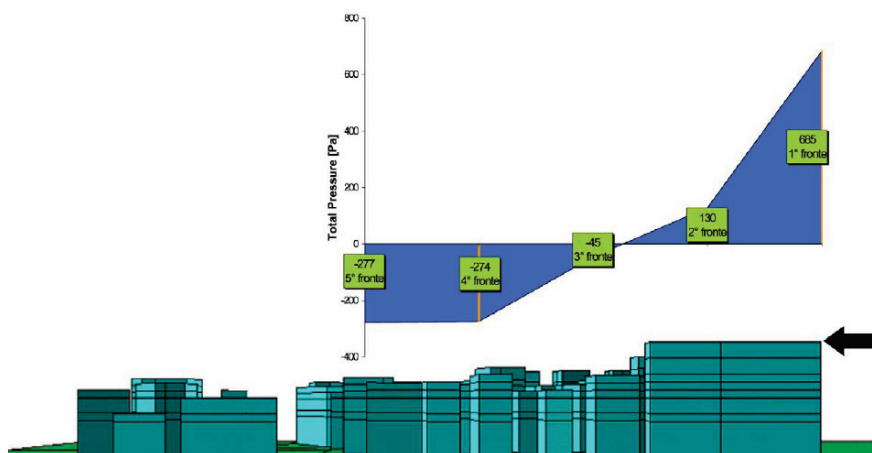


Figura 3. 20. Riduzione delle pressioni nella direzione principale del flusso piroclastico (Zuccaro e Ianniello, 2004).

Ulteriori valutazioni delle pressioni dinamiche prodotte dai flussi piroclastici lungo il pendio meridionale del Vesuvio sono state condotte da Nunziante et al. (2003). In particolare, sulla base dei Metodi Inversi, attraverso la valutazione dei danni subiti da alcuni resti di ville di epoca romana (site a Terzigno e Torre Annunziata) e distrutti dall'eruzione pliniana del 79dC, si è stimata l'entità dei flussi piroclastici agenti in un range compreso tra 1 e 9kPa.

3.4.2. Azione ed effetti sul costruito

Sulla base del modello di Todesco et al. (2002) e delle simulazioni di Esposti Ongaro et al. (2002), Spence et al. (2004) hanno valutato l'impatto di un flusso piroclastico prodotto da un'eruzione sub-Pliniana del Vesuvio sugli edifici di quattro città della zona rossa, Torre del Greco, Trecase, Boscotrecase e Boscoreale (Figura 3.13). In particolare, si sono stimate le pressioni prodotte dal flusso piroclastico generato dal collasso parziale della colonna pliniana durante un'eruzione sub-Pliniana. In Tabella 3.4, vengono riportati i picchi delle pressioni agenti sulle quattro facce di un edificio, a 5 e 15m dal piano campagna suolo, al variare della distanza dal cratere.

Tabella 3. 4. Pressione dinamica sulle diverse facciate degli edifici a 5 e 15m dal suolo, esercitata da un flusso piroclastico (Spence et al., 2004).

Distanza dal cratere [km]	Pareti di un edificio a 5m dal suolo				Pareti di un edificio a 15m dal suolo			
	Pressione dinamica del flusso [kPa]	Parete anteriore soprav. [kPa]	Parete laterale [kPa]	Parete posteriore sottov. [kPa]	Pressione dinamica del flusso [kPa]	Parete anteriore soprav. [kPa]	Parete laterale [kPa]	Parete posteriore sottovento [kPa]
4-5	0,90	0,77	-0,63	-0,27	1,25	1,06	-0,88	-0,38
5-6	0,70	0,60	-0,49	-0,21	1,05	0,89	-0,74	-0,32
6-7	0,95	0,81	-0,67	-0,29	0,95	0,81	-0,67	-0,29
>7	0,8	0,68	-0,56	-0,24	0,35	0,30	-0,25	-0,11

Le pressioni dinamiche risultanti di Tabella 3.4 sono apparentemente molto basse, ma la modellazione non è in grado di incorporare molti fattori di topografia locali e la forma dell'edificio, che influenzerebbero sensibilmente le pressioni di picco.

In sintesi, l'azione di un flusso piroclastico su una costruzione investita può schematizzarsi come una sovrappressione orizzontale uniformemente distribuita q_H lungo le facciate esposte al cratere ed una depressione lungo le

facciate sottovento pari a $q_H/3$ (Figura 3.21), accompagnata da temperature comprese tra i 150 e i 400°C. Il valore assunto da q_H è funzione della distanza dal cratere e della scala dell'eruzione (pliniana, sub-pliniana, stromboliana, ecc.). Ad esempio, nel caso di un'eruzione vesuviana sub-pliniana, per distanze superiori ai 4-5km dal cratere, si può assegnare a q_H un valore di 2-4kPa, adottando un coefficiente moltiplicativo delle pressioni per effetto delle turbolenze pari a 2.

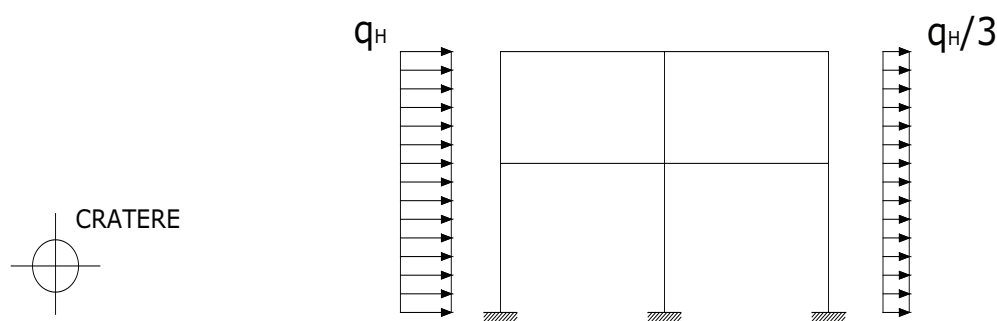


Figura 3. 21. Schematizzazione del carico dovuto ad un flusso piroclastico.

I flussi piroclastici ed i surges possono fagocitare insediamenti umani con poco preavviso e possono provocare un gran numero di perdite umane, così come la distruzione di beni e infrastrutture. Recentemente, le osservazioni dirette relative a Mt St Helens negli USA (1980), Unzen in Giappone (1991), e Montserrat, Piccole Antille nel mar dei Caraibi (1997) hanno permesso di studiare alcune caratteristiche dei flussi piroclastici.

Per ogni tipologia di edificio, esiste un grado di correlazione tra le caratteristiche del flusso ed il grado di danno, che può essere usato per ottenere misure più dirette delle variabili del flusso, così come viene fatto per i terremoti con la scala di intensità. Baxter et al. (2004), sulla base delle osservazioni fatte a Montserrat, hanno proposto una classificazione descrittiva dei livelli di danno, riportata in Tabella 3.5. La gravità dei danni osservati aumenta nella distanza di 2-3km dalla periferia all'asse principale di diffusione dei flussi, evidenziando un crescendo da danni più o meno leggeri (rottura finestre, collasso parziale tetti, ecc.) fino alla distruzione totale nell'area centrale al flusso (Figure 3.22 e 3.23).

In particolare, il Livello di danno 1 (danni leggeri) è presente in tutte le aree periferiche ed intermedie al flusso fino ai margini dell'area centrale (Figura 3.22a).

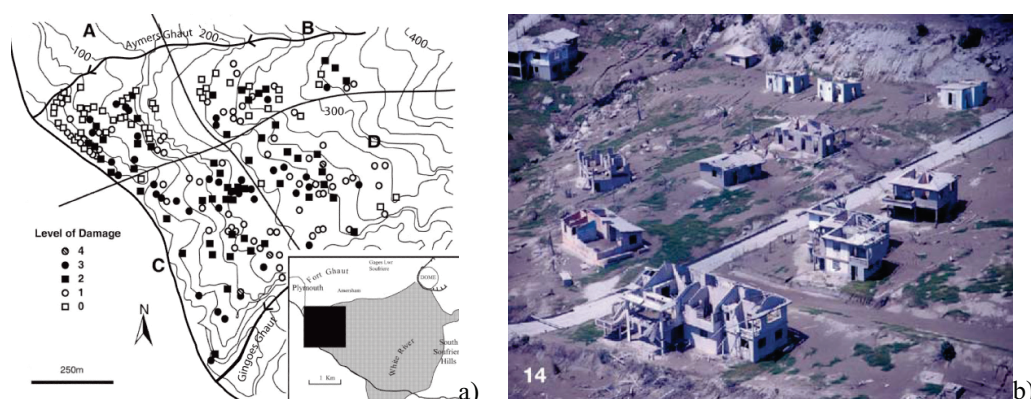


Figura 3. 22. Eruzione del vulcano Soufrière Hills, Montserrat, dicembre 1997. Zona di St. Patrick. a) Localizzazione delle abitazioni e dei loro livelli di danno. b) Danni prodotti da una corrente piroclastica in una zona intermedia del flusso. (Baxter et al., 2004).

L'esame dell'area intermedia al flusso di Figura 3.22b evidenzia la presenza di Livelli di danno compresi tra 1 e 3 per costruzioni situate a breve distanza l'una dall'altra. Ad esempio, l'edificio in legno posto nella parte superiore dell'immagine esibisce un Livello 1, perché protetto dalla topografia. La struttura in primo piano, invece, ha subito gravi danni: tetto spazzato via, finestre e relativi telai assenti, danneggiamento parziale delle pareti interne (Livello 3-4). Queste differenze riflettono una gamma di pressioni dinamiche variabili nell'intervallo 1-10kPa, all'interno di un raggio di 200 m. distanza e sono un esempio dei livelli di danni misti.

La relazioni tra le caratteristiche del flusso ed i danni alle strutture è importante. Essa permette, infatti, di dedurre il livello d'impatto di qualsiasi flusso piroclastico futuro e, di conseguenza, di stimare le perdite umane e i danni agli edifici di qualsiasi area abitata. Questo tipo di informazione è di fondamentale importanza per la preparazione dei piani di sicurezza delle aree a rischio.



Figura 3. 23. Eruzione del vulcano Soufrière Hills, Montserrat, dicembre 1997. Danni prodotti da una corrente piroclastica: a) in una zona periferica del flusso; b) in una zona intermedia del flusso; c) nella zona centrale del flusso. (Baxter et al., 2004).

Tabella 3. 5. Scala di danno per edifici investiti dalla pressione dinamica di un flusso piroclastico (Baxter et al., 2004).

Livello	Descrizione	Effetti osservati	Effetti stimati	Pressioni [kPa]
Livello 0	Nessun danno	Finestre e tetti intatti. Minimi danni da bruciatura alle costruzioni, incluse le strutture in legno. Assenza di spinta nei confronti di pali o recinzioni, carbonizzazione di pali della luce in legno, vegetazione e alberi. <i>Minime o assenti le penetrazioni di cenere. Infiltrazioni dovute a finestre socchiusse o a telai in cattive condizioni.</i>	Minimo danno eccetto a qualche vetro di finestra.	<1
Livello 1	Danni leggeri	Una o due finestre con vetro rotto sulle facciate rivolte verso il cratere. Danni anche estesi a tetti, a causa del fuoco. Effetti dovuti principalmente al calore non alla pressione dinamica. Pali intatti e non piegati. Grondaie in PVC fuse. <i>Penetrazione di un sottile strato di cenere. Calore localizzato nella stanza d'impatto o solo in una parte di essa.</i>	Feritoie di ventilazione in PVC fuse. Quelle in alluminio, in cattive condizioni. Conseguente ingresso di cenere. Vetri di finestre rotti	1- 3
Livello 2	Danni moderati	Finestre di legno vecchio e telai delle porte implose sulle facciate rivolte al cratere. Porte finestre e tetti parzialmente bruciati dal flusso di calore esterno, ma telai delle finestre intatti. Visibili effetti della pressione dinamica e del calore nelle zone circostanti. Flusso di detriti sparsi e chiazze di sabbie sulle mura rivolte al cratere. Tutte le ordinarie abitazioni in legno consumate. <i>Spessi strati di cenere nelle stanze dove è avvenuta la penetrazione, ma solo un fine strato resta sulla struttura. Incendi provocati dalla combustione di arredamento a causa del deposito di cenere calda su tetto esternamente danneggiato dal calore del flusso. Completa combustione nei locali in cui il fuoco si è verificato, parte del tetto bruciato dal fuoco interno.</i>	Finestre e telai per porte in alluminio danneggiati o distrutti	2- 6
Livello 3	Danni pesanti	Tutte le finestre sulle facciate rivolte al vulcano implose, telai mancanti. Sulle facciate opposte, finestre e telai soffiati via, tetti sollevati. Danni dovuti a missili, quali lamiere zincate e legno, messi in volo dalla corrente. Cime di robusti alberi tagliate, alberi, recinzioni e pali della luce abbattuti. <i>Fuoco diffuso all'interno con deposito di cenere dappertutto, tetto bruciato dagli incendi interni, dal calore diffuso dal deposito o dal calore trasferito dal flusso.</i>	Alcuni gravi danni a strutture in muratura. Strutture in c.a. con tamponature in muratura piena crollati in numerosi casi. Strutture in c.a. non antisismiche di uno o due piani crollate. Strutture in c.a., debolmente antisismiche, multi- piani crollate.	4- 10
Livello 4	Devastazione parziale	Come per il livello 3, ma con la perdita di parti di pareti interne e/o esterne. Numerosi impatti singoli o multipli di piccoli missili contro le pareti rivolte verso il cratere, la maggioranza o la totalità dei tetti crollati per il fuoco o sollevati se non in cemento armato. Ridotto numero di edifici ancora in piedi. Abbondanti detriti di missili.	Tutti i pannelli in muratura piena distrutti. Gravi danni estesi a edifici in muratura, crollati la maggior parte degli edifici in c.a. eccetto quelli fortemente antisismici.	8- 25
Livello 5	Devastazione totale	Pareti distrutte, strutture abbattute o solo in parte ancora in piedi. Numerosi impatti multipli da missili. Completa devastazione per il calore, pressione dinamica e missili; terra ricoperta da piccoli depositi o detriti.	Collasso di tutte le strutture in muratura e in c.a. non antisismiche. Sopravvivono solo strutture di uno o due piani in c.a. fortemente antisismiche, ma restano comunque seriamente danneggiate.	>25
Effetti secondari dovuti al calore o alle ceneri sono indicate in corsivo.				

3.5. I MISSILI VULCANICI

3.5.1 *Fenomeno*

I missili vulcanici sono piroclasti volanti di differenti dimensioni. Quelli più grandi sono esplosi direttamente dal cratere secondo traiettorie balistiche pure, mentre i clasti più piccoli possono essere trasportati per convezione nella colonna eruttiva, lanciati nell'atmosfera dal flusso principale o essere trasportati lungo i fianchi della montagna in correnti gravitazionali come illustrato in Figura 3.24 (Dobran, 2006).

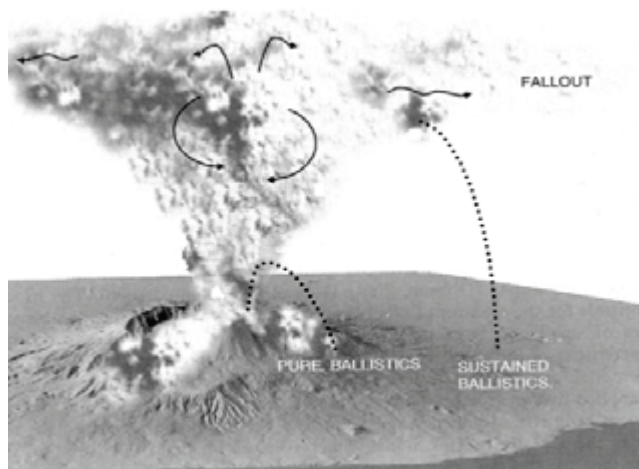


Figura 3. 24. Schematizzazione del fenomeno di trasporto dei clasti balistici (Dobran, 2006)

L'impatto dei frammenti vulcanici con il suolo può provocarne la frantumazione, nel caso degli elementi più fragili come le pomici, o formare profonde deformazioni nei depositi sottostanti, nel caso delle rocce più resistenti. La geometria delle deformazioni da impatto è utile per riconoscere il luogo di provenienza dei clasti e, quindi, per ricostruire la posizione del cratere nel caso di vulcani antichi parzialmente smembrati.

La legge che regola il movimento di un frammento vulcanico con traiettoria balistica nel vuoto è:

$$R=(u_0^2 \cdot \sin 2\theta)/g \quad (3.12)$$

dove: R è la distanza di eiezione del blocco, u_o è la velocità di eiezione, θ è l'angolo iniziale di eiezione del frammento rispetto al piano orizzontale e g è l'accelerazione gravitazionale.

Le componenti della velocità u_x ed u_y ed il tempo di volo t_G (ossia il tempo che intercorre fra l'istante del lancio e quello di arrivo), invece, sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} u_x &= u_0 \cdot \cos \theta \\ u_y &= u_0 \cdot \sin \theta - gt \\ t_G &= (2u_0 \cdot \sin 2\theta)/g \end{aligned} \quad (3.13)$$

La presenza della forza di gravità e del mezzo di trascinamento introducono ulteriori variabili al fenomeno. In effetti, la distanza R dipende dalla velocità del vento, dalla densità dell'aria, dalla massa del blocco balistico, dalla sezione trasversale e dal coefficiente di trascinamento.

E' stata, quindi, ricavata una legge che regola il movimento di un frammento vulcanico con traiettoria balistica, tenendo conto di tutti i fenomeni che possono influenzare tale percorso (Dobran, 2006):

$$R = 1/\mu \cdot \ln[\mu \cdot (u_o \cos \theta - w) \cdot t + 1] + wt \quad (3.14)$$

dove: $\mu = (\rho_a \cdot A \cdot C_D)/2m$, m è la massa del blocco, C_D è il coefficiente di trascinamento, θ è l'angolo iniziale di eiezione del frammento rispetto al piano orizzontale, w è la velocità del vento, ρ_a è la densità dell'aria, A è l'area della sezione trasversale del blocco, u_o è la velocità di eiezione e g è l'accelerazione gravitazionale.

Introducendo il termine ξ pari alla differenza tra la quota di lancio e quella di atterraggio della bomba, il parametro tempo t può essere espresso nel seguente modo:

$$t = \left[1/(\mu \cdot g)^{(1/2)} \right] \left\{ \cosh^{-1} \left[\left(1 + (\mu/g) u_o^2 \sin^2 \theta \right)^{(1/2)} e^{(\xi/\mu)} \right] + \tan^{-1} \left[(\mu/g)^{(1/2)} u_o \sin \theta \right] \right\} \quad (3.15)$$

Un'analisi della distribuzione dei depositi piroclastici dell'eruzione del 79A.D. al Vesuvio ha permesso di stimare la velocità di fuoriuscita dei clasti di natura balistica durante la fase delle pomici bianche e grigie. La loro distribuzione dipende dalla quantità di energia disponibile dal sistema e dalle condizioni dell'atmosfera durante l'eruzione. Clasti balistici sono frequenti nei depositi nell'area in esame (da 3 a 14km dal cratere) e ben osservabili nei depositi di pomici da caduta. Sono stati esaminati circa 300 clasti con diametro compreso tra 0,07 ed 1m. Alcuni frammenti sono più grandi di 0,3m e presentano una gittata di 9km che probabilmente rappresenta il limite balistico di questi clasti. L'applicazione dell'equazioni della balistica ha permesso il calcolo delle velocità iniziali dei blocchi campionati che risultano variare da 170 a 2300m/s. Alcuni di questi valori eccedono il valore teorico stimato per l'eruzione di tipo pliniano, per tanto ne discende l'inadeguatezza di un modello balistico semplice.

I clasti più piccoli, $0,1 < d < 0,3\text{m}$, non presenterebbero traiettorie balistiche pure in quanto sono dapprima sostenuti per convezione in regioni della colonna eruttiva ed in seguito lanciati nell'atmosfera attraverso digitazioni del flusso principale della colonna stessa, dalla quale possono cadere o essere trasportati ulteriormente lungo i fianchi del vulcano, in correnti gravitative. La resistenza del mezzo agente sui clasti balistici sarebbe inibita dall'azione dovuta all'espansione dei gas della colonna che, pertanto, favorirebbe il loro trasporto verticale e laterale. Nella modellazione di un scenario esplosivo del Vesuvio è necessario tener conto di tutta la popolazione dei clasti nei depositi esaminati in presenza di venti locali e stratosferici e del variare delle caratteristiche del magma del sistema vulcanico.

La presenza di un'atmosfera stratificata suggerisce che l'angolo ottimale di eiezione θ sia inferiore a 45° . In particolare, nel caso in cui il frammento vulcanico parta dalla colonna eruttiva e non dalla bocca, il valore ottimale di θ varia tra 47° e 50° per blocchi più grandi e tra 38° e 40° per quelli più piccoli.

3.5.2 *Azione ed effetti sul costruito*

Il moto dei missili vulcanici risponde a leggi piuttosto complesse, visto il numero di variabili in gioco (angolo e velocità di eiezione, velocità del vento, densità dell'aria, massa del blocco balistico, sezione trasversale, coefficiente di trascinamento). In questa sede, però, vista l'assenza di un modello fisico

che interpreti pienamente il fenomeno di trasporto dei clasti, nella schematizzazione dell'azione esercitata dai frammenti vulcanici volanti sulle costruzioni investite, ci si è rifatti a considerazioni più semplici.

L'azione esercitata da un missile vulcanico nei confronti di un edificio può essere assimilata ad un urto elastico e, quindi ad una forza impulsiva F (Figura 3.25), tra un corpo di massa m con velocità iniziale u_0 ed un altro corpo, inizialmente fermo, di massa M .

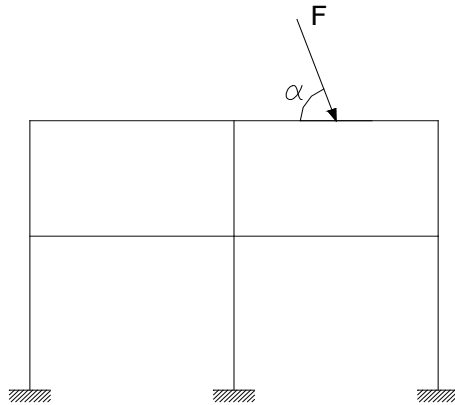


Figura 3. 25. Schematizzazione dell'azione esercitata da un missile vulcanico.

Nel caso di urto elastico, l'energia meccanica dell'intero sistema deve conservarsi. Inoltre, dato che in un urto, per definizione, si considera il sistema come isolato, si conserva anche la quantità di moto. Le forze in gioco sono di tipo impulsivo e, pertanto, è possibile trascurare le altre forze (come ad esempio quella gravitazionale), quindi l'energia del sistema è data dalla somma delle energie cinetiche dei corpi. Chiamando u_f e u_M , rispettivamente, le velocità finali del proiettile e del bersaglio, si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} m u_0^2 = \frac{1}{2} m u_f^2 + \frac{1}{2} M u_M^2 \\ m u_0 = m u_f + M u_M \end{cases} \quad (3.16)$$

Dal sistema (3.16) si ottengono le espressioni delle velocità finali:

$$\begin{cases} u_f = \frac{m-M}{m+M} u_0 \\ u_M = 2 \frac{m}{m+M} u_0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Poiché nell'urto tra i due corpi si registrano delle variazioni di velocità, esisteranno, evidentemente, delle accelerazioni, e per la seconda legge della dinamica queste devono essere state causate da forze. Se il sistema dei due corpi che si urtano è isolato, allora si mantiene costante la quantità di moto complessiva dei due corpi (principio di conservazione della quantità di moto) e, istante per istante, i due corpi esercitano l'uno sull'altro delle forze uguali ed opposte. Va tenuto presente, inoltre, che per quanto breve sia l'urto, esso ha una durata finita e l'entità di tale durata è fondamentale per poter valutare le grandezze in gioco. Se una forza \vec{F} agisce per Δt secondi, si chiama impulso della forza il vettore $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$.

Se la forza, nell'intervallo di tempo considerato, è stata esercitata da un corpo di massa m , dette u_0 e u_f le velocità possedute dal corpo, rispettivamente, negli istanti iniziale e finale dell'azione della forza \vec{F} , allora l'impulso è pari alla variazione della quantità di moto del corpo stesso. Nell'ipotesi che la massa m rimanga costante durante l'azione, la variazione della quantità di moto si esprime nella seguente forma:

$$m\Delta\vec{u} = m(\vec{u}_f - \vec{u}_0) \quad (3.18)$$

Sussiste pertanto l'uguaglianza:

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t = m(\vec{u}_f - \vec{u}_0) \quad (3.19)$$

Quindi, viste anche le (3.16), l'intensità della forza d'impatto può essere espressa attraverso la seguente relazione:

$$F = \frac{m(u_f - u_0)}{\Delta t} = -\frac{2mM}{m+M} \frac{u_0}{\Delta t} \quad (3.20)$$

L'incertezza di questa schematizzazione sta nella individuazione della durata dell'impulso Δt . Dunque, appare più corretto rifarsi alla valutazione delle energie cinetiche del proiettile m ($E_{c,f}$) e del bersaglio M ($E_{c,M}$), che sulla base delle (3.17) valgono:

$$\begin{cases} E_{c,f} = \frac{1}{2} m \left(\frac{m-M}{m+M} \right)^2 u_0^2 \\ E_{c,M} = \frac{1}{2} M \left(2 \frac{m}{m+M} \right)^2 u_0^2 \end{cases} \quad (3.21)$$

L'impatto del missile vulcanico di massa m provocherà collasso se la porzione della sua energia cinetica trasferita al corpo M ($E_{c,M}$) sarà sufficiente a produrre la crisi della costruzione investita o di una sua parte, ossia se $E_{c,M}$ risulta maggiore o uguale dell'energia assorbita dal corpo M nella sua deformazione elastica fino alla crisi.

Ad esempio, nel caso delle finestre in vetro (modulo di Young pari a 65.000MPa), l'energia necessaria alla rottura varia da 8 a 20J, per finestre di dimensioni medie e grandi, con vetri dello spessore di 3÷4mm. Si può presumere, dunque, che missili con energia cinetica inferiore ad 8J romperanno poche finestre, missili con energia cinetica tra 8 e 20J romperanno alcune finestre e missili con energia cinetica superiore a 20J romperanno più finestre.

Come per i depositi da caduta e i flussi piroclastici, anche per i missili vulcanici va computata la variabile temperatura.

Una trattazione simile è possibile per gli oggetti (particolato, detriti di vario genere, pietre, fioriere, pattumiere, ecc.) messi in moto dai flussi piroclastici. Essi vengono incorporati nella corrente principale e incrementano l'effetto distruttivo dei flussi. Secondo Spence et al., (2007) questi "missili" possono essere assimilati, per la loro aerodinamica, ai detriti volanti che si generano nel caso di cicloni o tempeste di vento.

La produzione di missili produce un ulteriore aggravio del processo di rischio associato alla dinamica dei flussi piroclastici. Molte delle eruzioni occorse mostrano come gran parte dei danni subiti dagli edifici siano stati causati da oggetti trascinati all'interno delle correnti piroclastiche. Ad

esempio, la Figura 3.26 mostra i danni subiti da alcune abitazioni durante l'eruzione del 1997 del vulcano Soufrière Hills (Montserrat, Caraibi, UK), a causa di lamiere in acciaio strappate dal loro stesso tetto o da quelli di abitazioni adiacenti (Baxter et al., 2004).



Figura 3. 26. Eruzione del 1997 del vulcano Soufrière Hills, Montserrat (Baxter et al., 2004).

Esistono differenti tipologie di possibili oggetti messi in volo da una corrente piroclastica, dunque, un'analisi completa del fenomeno dovrebbe tener conto della forma, del peso, della resistenza al volo e del probabile numero e distribuzione che tali oggetti possano avere. Esposti Ongaro et al. 2002, invece, considerano solo missili isolati, di differenti materiale e forma, fornendo un ordine di grandezza della massima dimensione di un oggetto potenzialmente trascinato da un flusso (Figura 3.27a) e dell'energia cinetica associata a tale volo (Figura 3.27b) al variare della distanza dal cratere. In particolare, essi considerano solo oggetti compatti e bidimensionali, cosiddetti "a foglia", in acciaio (densità $\rho=8000\text{kg/m}^3$), legno ($\rho=500\text{kg/m}^3$) o pietra ($\rho=2700\text{kg/m}^3$) che possono essere trascinati da un flusso originatosi in seguito ad un'eruzione sub-pliniana del Vesuvio con flussi diretti verso il settore sud-ovest del vulcano, con un angolo di apertura dei flussi pari a 90° , contenuto in acqua della miscela eruttiva pari al 2% e temperatura al cratere di 950°C (eruzione del tipo A90-w2-t950). I risultati ottenuti mostrano che più la densità dell'oggetto trascinato è bassa più l'energia cinetica ad esso associata è alta. Gli oggetti più pericolosi sono infatti quelli in legno, i cui valori di energia cinetica sono compresi tra circa 10^7J , a 2km dal cratere, e 10^3J , a 7,5km dal cratere.

I danni provocati dipendono dall'energia cinetica del missile e dalla relativa vulnerabilità di edifici e persone. Nel caso di frammenti prodotti da vento e cicloni, Wills et al. (1998) propone una classificazione per dimensioni, distinguendo oggetti:

- *compatti*, con dimensioni dello stesso ordine di grandezza secondo tre direzioni;
- *a foglia*, con due dimensioni dello stesso ordine di grandezza ed una terza molto più piccola;
- *ad asta*, con due dimensioni dello stesso ordine di grandezza, ma molto più piccole della terza.

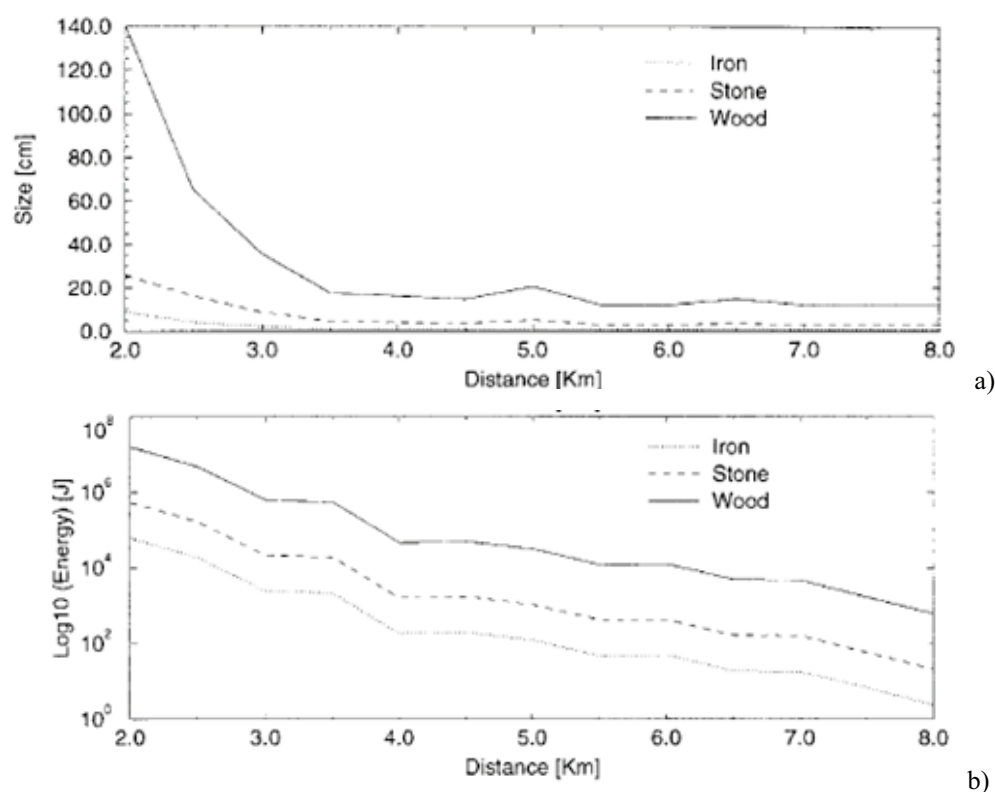


Figura 3. 27. Distribuzione della massima dimensione (a) e dell'energia cinetica (b) dei missili messi in moto dal flusso generatosi lungo il versante meridionale A del Vesuvio per un'eruzione sub-Pliniana del tipo A90-w2-t950 (Esposti Ongaro et al., 2002).

Le dimensioni di un oggetto che può essere alzato in volo da una corrente a densità piroclastica (PDC) sono proporzionali al quadrato della velocità del flusso. La potenziale causa di danno, invece, è riferita all'energia cinetica dell'oggetto. Se la velocità di volo di quest'ultimo è una frazione W della velocità U della corrente (cioè la velocità di volo dell'oggetto è $W \times U$ in m/s), le equazioni determinate da Wills possono essere riscritte (Spence et al., 2007), in modo da poter determinare l'energia cinetica E_k del più grande oggetto probabilmente in volo nel flusso, in relazione alla velocità di flusso U :

$$\begin{aligned}
 \text{Oggetto compatto: } E_k &= \frac{1}{16} \rho_0 \left(\frac{\rho_{pf} C_f}{\rho_0 I g} \right)^3 W^2 U^8 \\
 \text{Oggetto a foglia: } E_k &= \frac{1}{4} \rho_{pf} \left(\frac{C_f W^2}{I g} \right)^3 A U^4 \\
 \text{Oggetto ad asta: } E_k &= \frac{1}{4} \rho_{pf} \left(\frac{C_f W^2}{I g} \right)^3 U^4 d
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

dove: ρ_0 (kg/m³) è la densità di un oggetto come potenziale missile; ρ_{pf} (kg/m³) è la densità del flusso piroclastico; C_f è un *coefficiente forza* applicabile a diverse forme di missili potenziali in una PDC (per oggetti compatti vale 1, per oggetti a foglia 0,3, per oggetti ad asta 0,6); I è un *coefficiente di fissità* per piccoli oggetti in ambiente urbano, pari ad 1 per oggetti liberi e superiore all'unità per oggetti vincolati; g è l'accelerazione di gravità pari a 9,81m/s²; W è la frazione della velocità U della corrente che rappresenta la velocità di volo dell'oggetto trasportato; A (m²) è l'area dell'oggetto a foglio.

In Figura 3.28 sono riportati i valori dell'energia cinetica di assicelle in legno con rapporto di snellezza (rapporto tra la lunghezza ed una dimensione trasversale rappresentativa) pari a 25, una volta raggiunte le condizioni di "volo". La curva più in alto è quella di involuppo. Essa indica l'energia massima di un oggetto trasportato da flusso con una certa velocità.

Spence et al. (2007) hanno stimato la probabilità che "missili" messi in moto da una corrente piroclastica danneggino finestre poste ai piani inferiore e superiore di un edificio (Tabella 3.6). Il flusso piroclastico è stato schematizzato con diverse velocità e due densità (3 e 5kgm⁻³), mentre

l'intervallo di grandezza dei potenziali missili è compreso tra il valore della m più piccola in grado di rompere finestre e la massa più grande in volo. Le probabilità di danneggiamento delle finestre per effetto del flusso piroclastico sono mostrate solo per omogeneità di confronto.

Le probabilità che missili messi in volo da una PDC rompano finestre poste al piano terra di un edificio sono stimate Tabella 3.7, con riferimento a due categorie di disponibilità di oggetti, normale e alta. La disponibilità “normale” si applica alla maggioranza degli ambienti urbani, mentre la disponibilità “alta” si applica alle situazioni con elevata presenza di elementi liberi.

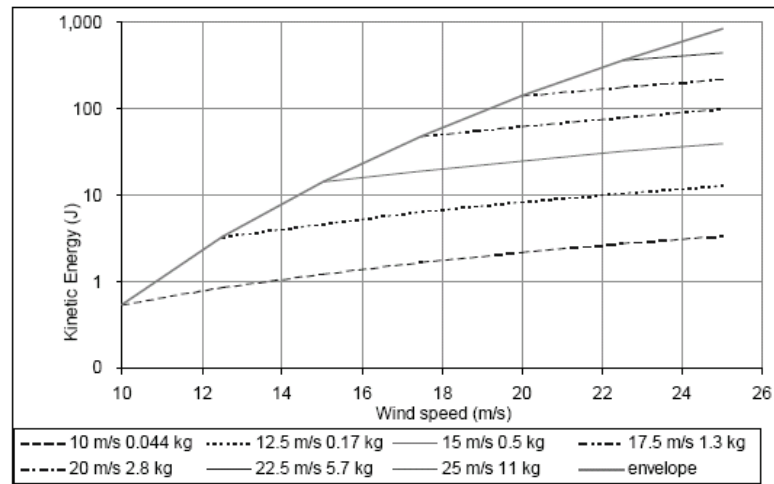


Figura 3. 28. Energia cinetica di assicelle in legno con rapporto di esilità pari a 25. La velocità del vento è quella in grado di sostenere l'oggetto in volo (Spence et al., 2007).

Tabella 3. 6. Ranges delle dimensioni di potenziali missili messi in volo da una PDC e stima della relativa probabilità di danneggiamento di finestre poste ai piani inferiori e superiori di un edificio, per assegnate velocità e densità del flusso (Spence et al., 2007).

Velocità del flusso	Pressione del flusso per assegnate densità		PROBABILITA' che il flusso rompa le finestre		Min massa in grado di rompere finestre	Max massa in volo	PROBABILITA' che un missile rompa finestre ai piani inferiori (1.5m sopra il piano campagna)	PROBABILITA' che un missile rompa finestre ai piani superiori (>4m sopra il piano campagna)
[ms ⁻¹]	[kPa]		[%]		[kg]	[kg]	[%]	[%]
	3kgm ⁻³	5kgm ⁻³	3kgm ⁻³	5kgm ⁻³				
15	0.34	0.56	0	0	0.09	0.50	0	0
25	0.94	1.56	0	2.9	0.03	11	50	10
35	1.84	3.06	2.9	98.8	0.02	81	100	50
45	3.04	5.06	88.5	100	0.01	365	100	100

Tabella 3. 7. Probabilità di danneggiamento di finestre al piano terra da parte di missili messi in volo da una PDC. Pochi= 5% probabilità; Alcuni= 30% probabilità; Molti= 70% probabilità (Spence et al., 2007).

Velocità del flusso [ms-1]	DISPONIBILITA' DI MISSILI		PROBABILITA' DI COLLASSO	
	Normale	Alta	Normale	Alta
15	Nessuno	Nessuno	0.0	0.0
25	Pochi	Pochi	0.02	0.15
35	Alcuni	Alcuni	0.2	0.7
45	Molti	Molti	0.7	0.9
Media della distribuzione normale		[ms-1]	42	32
Deviazione standard della distribuzione normale		[ms-1]	9	7

3.6. I TERREMOTI VULCANICI

3.6.1. Fenomeno

Tutte le eruzioni vulcaniche sono accompagnate da attività sismica locale. A tal proposito, a titolo di esempio, nella Tabella 3.8, sono riportati i parametri degli sciami sismici associate ad importanti eruzioni vulcaniche verificatesi tra il 1979 e il 1991 (Benoit e Mc Nutt, 1996).

A differenza dei terremoti tettonici, generalmente correlati ad un meccanismo di taglio nella faglia terrestre, quelli vulcanici sono imputabili a fratture da taglio o trazione nelle rocce causate dalla pressione esercitata dalla percolazione di sostanze fluido- gassose ad elevate temperature o dalla risalita dei magmi.

I terremoti causati dalle attività vulcaniche sono generalmente classificati in quattro categorie:

- terremoti vulcano-tettonici (VT),
- terremoti di lungo periodo (LP),
- tremore armonico (T),
- eventi superficiali (SES).

Dal punto di vista dell'analisi sismica, nella valutazione di pericolosità in fase di pre- eruttiva, i terremoti vulcano- tettonici sono gli unici a dover essere considerati. Generalmente, infatti, sia gli eventi sismici superficiali che i

tremori armonici si verificano soltanto durante l'eruzione, mentre nella fase pre-eruttiva esibiscono ampiezze molto basse. I terremoti di lungo periodo, invece, potrebbero essere presenti nella fase precedente l'eruzione, ma eventi di alta magnitudo sono raramente osservabili prima dell'eruzione stessa. Inoltre, i terremoti LP possono coinvolgere solo i segnali a bassa frequenza, e, dunque, non sempre sono associabili ad un preciso meccanismo di origine.

Tabella 3. 8. Parametri relativi alle registrazioni sismiche associate ad eruzioni di piccola, media e larga scala nel periodo 1979-1991 (Benoit e Mc Nutt, 1996).

	Data eruzione	Data inizio sciame sismico	Durata dello sciame	Magnitudine massima	Periodo di ritorno dell'eruzione [anni]
VEI 3					
Soufrière St. Vincent	04/12/79	08/12/78	240 days	-	8
Ulawu	10/06/80	10/03/80	3 days	-	2.4
VEI 4					
Alaid	04/30/81	04/26/81	22 days	M 3.5	9
Pagan	05/15/81	04/01/81	>45 days	M 4.0	58
Galunggung	05/17/82	-	-	one felt	64
Una Una	07/23/83	07/04/83	24 days	M 4.6	85
Augustine	03/27/86	02/10/90	45 days	ML 2.1	10
Chikurachki	11/18/86	-	-	Strong	13
Kelut	02/10/90	11/15/89	90 days	< Md 2.0	24
VEI 5					
El Chichon	04/03/82	03/01/82	28 days	Md 4.0	650
Mount St. Helens	04/18/80	03/20/82	59 days	M 5.1	123
VEI 6					
Pinatubo	06/15/91	04/05/91	>70 days	M 4.3	600
Hudson, Cerro	08/12/91	-	-	felt	20?

In una fase di quiete del vulcano, i terremoti vulcano-tettonici presentano bassa sismicità (inferiore a 3). Essi sono legati alla presenza di antichi condotti magmatici estesi per chilometri sotto il cratere e riempiti di magma ormai solidificato. Si ritiene che siano generati dai forti sforzi gravitativi dovuti al peso del vulcano stesso, che si focalizzano intorno all'asse craterico a causa delle forti variazioni di rigidità nella zona. Tuttavia a questi eventi, con l'approssimarsi dell'eruzione, si sovrappone una sismicità di origine diversa legata a variazioni della dinamica interna del vulcano, principalmente dovuta alla migrazione del magma, che può generare crisi sismiche rilevabili dalle reti di monitoraggio.

3.6.2. Azione ed effetti sul costruito

L'intensità di un terremoto vulcanico è funzione dell'entità dell'evento eruttivo. Per esempio, nel caso del Vesuvio, secondo fonti storiche, molti l'eruzione pliniana del 79d.C. fu preceduta da importanti scosse. Successivamente, la crisi sismica che precedette l'eruzione sub-pliniana del Vesuvio del 1631 fu caratterizzata da un'intensità pari al IV grado della scala Richter, temporalmente limitata ad alcune ore prima dell'evento vulcanico (Figura 3.29).

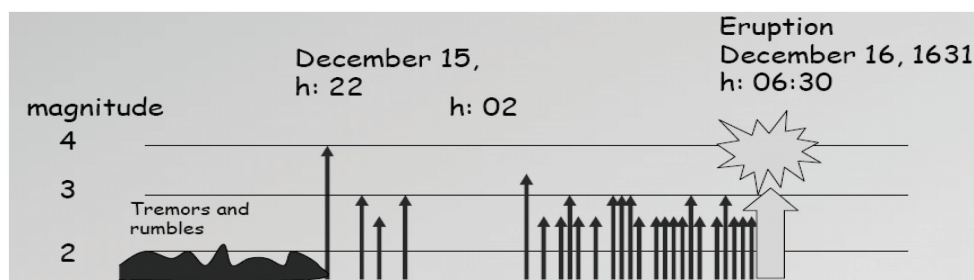


Figura 3. 29. Eventi sismici precedent l'eruzione sub-pliniana del 1631 del Vesuvio (Cubellis e Marturano, 2006).

Dal 1631 fino a tempi recenti, i terremoti vesuviani correlato all'attività eruttiva sono stati, in genere, di energia basso-moderata. L'evento maggiore si è verificato il 15 Giugno 1794 durante l'eruzione laterale che distrusse la città di Torre del Greco. Le scosse causarono danni agli edifici della zona vesuviana e vetri in frantumi nella città di Napoli.

Dal 1944, data dell'ultima eruzione vesuviana, la sismicità del Vesuvio è stata caratterizzato da poche centinaia di eventi all'anno concentrati nella caldera sommitale. L'evento più significativo è stato registrato prima dello sviluppo della rete di sorveglianza sismica del Vesuvio nel 1970, l'11 maggio 1964 (V grado MCS), nel fondo del cratere. Periodi di maggiore attività sono stati registrati nel 1989, nel 1990 e, più recentemente, nel 1995 e nel 1996. La scossa più forte è avvenuta il 25 aprile 1996 ($M_L=3.4$, $h=2$ km). Essa fu avvertita distintamente in tutta l'area vesuviana, a Napoli e in alcune zone dei Campi Flegrei e sull'isola di Capri. Nei primi mesi del 1999, la sismicità è leggermente aumentata (Tabella 3.9). Una sequenza sismica iniziò il mese di

agosto e culminò, con una manifestazione più energica, il 9 ottobre ($M_L=3.6$, $h=3-4$ Km).

Tabella 3. 9. Parametri degli eventi sismici legati all'attività vulcanica del Vesuvio del 1999 (Del Pezzo et al., 2004).

DATA (mm-gg-aa hh-mm)	LATITUDINE (N)	LONGITUDINE (E)	PROFONDITÀ [km]	M
07-03-99 22-51	40°49'26"	14°25'12"	1,7	1,7
08-05-99 21-17	40°49'33"	14°25'22"	1,7	1,9
03-11-99 03-49	40°49'25"	14°25'39"	2,6	2,0
09-30-99 08-22	40°49'26"	14°25'36"	2,0	2,1
04-12-99 11-07	40°49'24"	14°25'39"	1,4	2,4
10-11-99 05-05	40°49'28"	14°25'39"	1,5	2,6
11-05-99 05-55	40°49'26"	14°25'31"	1,5	2,7
11-10-99 20-14	40°49'49"	14°25'46"	1,7	2,8
10-11-99 04-35	40°49'29"	14°25'34"	1,6	3,3
10-09-99 07-41	40°49'52"	14°25'52"	4,0	3,6

I dati sismici hanno mostrato la presenza nella parte centrale del Vesuvio fino a circa 5 km di profondità, di un antico condotto vulcanico attualmente non più attivo e riempito da magma solidificato. Intorno a questa area si generano ogni anno un centinaio di terremoti di bassa magnitudo generalmente non avvertiti dalla popolazione vesuviana, ma registrati dai sistemi di monitoraggio. Questi terremoti sono legati principalmente al peso dell'edificio vulcanico e alla concentrazione degli sforzi gravitativi in corrispondenza dell'antico condotto, e non possono essere considerati quindi come fenomeni precursori di una ripresa dell'attività vulcanica. Tuttavia a questi eventi si sovrappone una sismicità di origine diversa legata a variazioni della dinamica interna del vulcano, principalmente dovuta alla migrazione del magma, che può generare crisi sismiche con grande numero di eventi per anno, come accaduto ad esempio nel 1989, 1995-'96, 1999. Questi terremoti indicano che anche se il Vesuvio è in quiescenza dall'ultima eruzione del 1944 è tuttavia ancora un vulcano attivo. La sua sorgente, cioè la camera magmatica in cui il magma continua ad accumularsi, è stata identificata intorno a 8-10km di profondità, dove i dati sia sismici che chimici evidenziano una zona di accumulo di magma molto estesa e probabilmente comune anche agli altri vulcani attivi della Campania, i Campi Flegrei e l'isola d' Ischia.

Secondo la Zonizzazione Sismica, il territorio della Campania è quasi tutto di seconda categoria con intensità macrosismica attesa $I=7,8$ (riferita alla scala

MCS Mercalli, Cancani, Sieberg) ed accelerazione al suolo (PGA) compresa tra 0,15 e 0,25g. Il sistema per il monitoraggio sismico del Vesuvio ha lo scopo di rilevare una serie di segnali associabili a processi che si sviluppano all'interno del vulcano e che possono essere attribuiti a variazioni dello stato dinamico del sistema. Esso è basato su dodici stazioni sismiche che trasmettono via radio i segnali al centro di acquisizione. Tali stazioni costituiscono un sottoinsieme della rete sismica dell'Osservatorio Vesuviano su cui si basa il monitoraggio dei vulcani campani.

Festa et al. (2004) hanno valutato il danno potenziale di un terremoto vulcanico vesuviano, con l'ausilio di rappresentativi parametri spettrali. Nell'evoluzione di un sistema vulcanico da uno stato quiescente ad uno stato eruttivo, si verificano un gran numero di terremoti di piccola e media intensità. Gli effetti cumulati di queste numerosi, seppur modesti, eventi sismici possono anche causare danno strutturale da fenomeni da fatica. Pertanto, per strutture molto rigide, quali gli edifici in muratura o quelli bassi in c.a., sono attesi danni già nella fase pre- eruttiva.

3.7. I LAHARS

3.7.1. Fenomeno

Spesso, i fenomeni alluvionali sono concatenati all'attività eruttiva e, in modo più specifico, a quella esplosiva. Quest'ultima è caratterizzata dall'emissione, di materiali poco coerenti (ceneri, pomici e lapilli) derivanti dalla frammentazione del magma che, giungendo nella parte sommitale del condotto, a causa della liberazione improvvisa dei gas depressurizzati, viene sgretolato in elementi di diversa grandezza. I depositi dei prodotti dell'attività vulcanica esplosiva ricoprono le superfici dei vulcani, con spessori che vanno da pochi centimetri fino ad oltre centinaia di metri, generando ammassi caratterizzati da un'elevata instabilità gravitativa. Elementi come la scarsa coerenza dei materiali vulcanici derivanti dalla frammentazione del magma, le elevate pendenze che spesso si riscontrano sugli apparati vulcanici (20°-30°) e la sismicità che accompagna e segue una fase eruttiva, possono contribuire a determinare condizioni di equilibrio precario dei depositi che rivestono i

vulcani ed i rilievi circostanti. A rendere ancora più instabile questo delicato equilibrio intervengono le piogge che, di sovente, seguono gli eventi vulcanici esplosivi di una certa energia. Queste piogge sono innescate dal cambiamento dello stato termico atmosferico in prossimità del vulcano a seguito dell'eruzione, nonché dalla presenza delle ceneri che raggiungono altezze di diversi chilometri fungendo da nuclei di condensazione del vapore acqueo (Carlino, 2001). Quando i materiali accumulati sui pendii in prossimità del vulcano raggiungono le condizioni critiche di stabilità, le piogge innescano la mobilitazione del deposito, con la formazione di colate di fango e *lahars* (Figura 3.30).

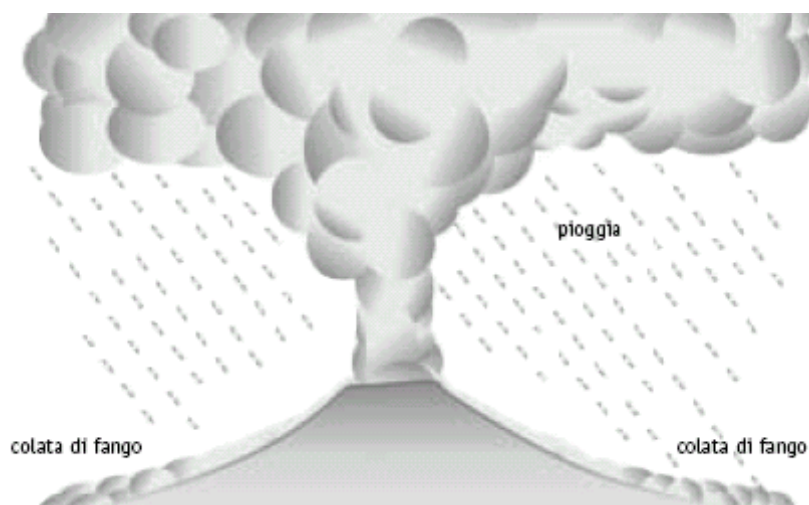


Figura 3. 30. Formazione dei lahars (Carlino, 2001).

Il termine *lahar* è di origine indonesiana e fu utilizzato per la prima volta da Escher, nel 1922, per descrivere i flussi di fango originatisi da un'eruzione vulcanica avvenuta in un lago. Questo termine viene oggi comunemente usato per indicare qualsiasi tipo di flusso fangoso contenente materiale vulcanico. Tuttavia, in molti casi, si adopera il sostantivo *lahar* quando si parla di grosse colate di materiale vulcanico, talvolta ancora caldo, per distinguerlo dalle colate di fango che, generalmente, coinvolgono volumi minori di detrito e che sono sempre scaturite in seguito alle piogge. In genere tutti flussi di fango sono condizionati da meccanismi di trasporto e sedimentazione simili a quelli delle frane (*debris flow*) di materiale non vulcanico. Questi si muovono per

effetto della gravità ed il moto stesso è vincolato da parametri come lo sforzo di taglio, la concentrazione del flusso e la pendenza della superficie di scorrimento.

I depositi da colata di fango risentono fortemente del controllo topografico, per cui frequentemente si incanalano in depressioni o si accumulano allo sbocco di valli. Al loro interno, in taluni casi, si possono trovare dei tronchi carbonizzati o delle strutture da degassazione, indici evidenti che al momento della messa in posto il deposito aveva ancora temperature elevate. Gli spessori dei depositi da colata o da lahar possono essere estremamente variabili, da pochi metri fino a diverse decine di metri, con ispessimenti nella parte anteriore del flusso.

Le condizioni estremamente pericolose determinate dalle colate di fango derivano dalla loro elevata energia cinetica, indotta dalla velocità di spostamento, generalmente dell'ordine di diverse decine di chilometri all'ora, fino ad oltre 100km/h, e dalle caratteristiche granulometriche del flusso. La densità e l'energia di trasporto delle colate di fango possono essere talmente elevate da trascinare per diversi chilometri detriti con una granulometria molto eterogenea e con massi di grandi dimensioni. Non di rado capita di osservare sulle pendici del Vesuvio depositi da colata o da lahar che inglobano blocchi di roccia vulcanica di dimensioni superiori al metro (Carlino, 2001).

Le colate di fango ed i lahar, che da un punto di vista fisico vanno sotto il nome generico di flussi di massa, possono generarsi in condizioni iniziali che variano dalle concentrazioni più basse (basso rapporto solido/fluido), fino ai flussi estremamente concentrati (alto rapporto solido/fluido). Anche le temperature delle colate e dei lahar sono assai variabili e dipendono, oltre che dalla tipologia e dalla quantità dei materiali e dei gas eruttati, dai tempi che intercorrono tra il momento della deposizione di questi ultimi e il momento della rimobilizzazione. E' evidente che, a parità delle altre condizioni, maggiore è il tempo intercorso, minori saranno le temperature delle masse rimobilizzate.

Un ulteriore elemento di pericolosità delle colate di materiale piroclastico, è determinato dalla facilità con cui l'acqua riesce a miscelarsi ad esse durante il percorso del flusso verso valle. Il contenuto d'acqua è, in particolare, un elemento che determina la maggiore o minore densità e viscosità di un flusso. La mobilità di quest'ultimo, difatti dipende strettamente dalla sua viscosità,

ovvero dalla maggiore o minore capacità di scorrere su un pendio sotto l'azione del campo gravitazionale. A tal proposito, si osservi che i flussi newtoniani (meno viscosi) si muovono liberamente sotto l'azione della gravità, non appena insorgono le condizioni critiche di stabilità, mentre i flussi di *Bingham* necessitano di uno sforzo aggiuntivo per potersi mobilitare, poiché il loro comportamento è più viscoso. A parità di altre condizioni (pendenza del piano di scorrimento, granulometria del flusso, ecc.), la capacità di moto di una colata di fango dipende dal contenuto in acqua di quest'ultima, e dalla capacità della stessa di perdere o immagazzinare acqua durante il suo percorso.

Diversi esperimenti eseguiti in Giappone, su alcuni vulcani attivi, hanno fornito dei dati sulle condizioni di criticità della pioggia, che determina l'innescò delle colate di fango e dei lahar. Essi indicano che, per uno spessore di 500mm di piroclastiti mediamente cerniti, di lunghezza pari a 300m, su un pendio di 17-18 gradi, la pioggia critica è uguale a circa 20mm, con un'intensità approssimativa di 10mm/h (Carlino, 2001).

Ulteriori condizioni di pericolosità possono provenire dalla presenza di ghiaccio o di laghi vulcanici che rappresentano dei serbatoi naturali d'acqua. In questo caso il grado di rischio è proporzionale al volume d'acqua disponibile.

Altri fattori che vanno considerati nel quantificare il rischio di colate di fango e lahar sono le pendenze dei fianchi del vulcano, la presenza di alvei e linee di impluvio nei quali possono incanalarsi i flussi e il grado di infiltrazione delle acque piovane.

Le colate di fango, mediamente ricche di acqua, possono essere assimilate a dei fluidi newtoniani. Quelle con alto rapporto solido/acqua, invece, offrendo una maggiore resistenza al moto, si comportano come flussi di *Bingham*.

Le colate di fango, durante il loro percorso, sono in grado di assumere dei caratteri intermedi tra flussi newtoniani e di *Bingham*. In taluni casi una colata che inizialmente ha le caratteristiche di un fluido newtoniano, può divenire di tipo *Bingham* per la perdita d'acqua che subisce nel suo spostamento da monte a valle. In questo caso la colata può arrestarsi prima, poiché non è più in grado di scorrere liberamente sotto l'azione della gravità, come per i fluidi newtoniani.

In molti casi, i lahar si verificano in coincidenza di eruzioni esplosive o ne sono una diretta conseguenza, ma possono avvenire anche a distanza di mesi dall'eruzione, favoriti dalla caduta di acqua piovana. Dopo l'eruzione del Vesuvio del 1906 si verificarono valanghe di fango per tutto l'anno successivo. Una delle più gravi catastrofi vulcaniche degli ultimi tempi, quella del Nevado del Ruiz (Colombia) nel 1985, che ha provocato 25000 morti, è stata causata da lahar. Un'eruzione di piccola rilevanza fece sciogliere il ghiaccio formatosi sul vulcano, alto oltre 5000m, provocando valanghe che si sono incanalate lungo le valli per più di 50km, distruggendo il villaggio di Armeno varie ore dopo l'inizio dell'eruzione.

3.7.2. Azione ed effetti sul costruito

L'azione esercitata da un lahar su una costruzione può essere schematizzata come la somma di un carico dinamico ed un carico statico (Figura 3.31), le cui rispettive risultanti S_d ed S_s valgono:

$$S_{cl,d} = \rho v^2 h b \cos^2 \vartheta; \quad S_{cl,s} = \frac{1}{2} \rho g h^2 b \quad (3.23)$$

dove: ρ è la densità del flusso, v è la velocità, h e b sono l'altezza e la larghezza del fronte del flusso e ϑ è l'angolo con cui il flusso impatta la superficie della struttura.

Alle spinte S_s e S_d va sommato l'effetto delle temperature che, in genere, per i fanghi vulcanici rimangono al di sotto dei 100°C.

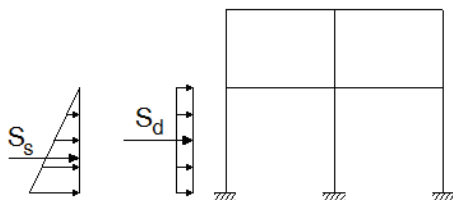


Figura 3. 31. Schematizzazione dell'azione dovuta ad un lahar.

L'azione esercitata da un lahar nei confronti di una struttura, però, può essere assimilata a quella esercitata da una colata di fango con l'aggiunta della variabile temperatura.

A tal proposito, Faella e Nigro (2002), sulla base dei danni prodotti agli edifici dalla frana del Sarno (Campania, Italia), propongono dei meccanismi di crollo utili per comprendere gli effetti delle colate di fango. Allo scopo di interpretare gli effetti di una massa semi-solida sulle strutture, lo studio si riferisce a prove su modelli analitici, basati sull'osservazione del danno e la successiva valutazione dell'energia spesa dal flusso di fango per produrre un certo danno. Questa energia può essere trasformata in un sistema di forze equivalenti che agiscono sulla struttura, producendo lo stesso danno. Gli effetti dell'impatto della frana sugli edifici varia con i seguenti parametri:

- tipologia strutturale (muratura, telai in c.a.);
- direzione del flusso di fango rispetto all'edificio (frontale, tangenziale);
- valore dell'energia cinetica.

Nel caso di impatto frontale, l'energia cinetica è trasmessa direttamente all'edificio, producendo, per strutture in muratura, la rottura dei muri ortogonali alla direzione del flusso. Per strutture a telai in c.a., invece, non è il semplice crollo delle tamponature a provocare riduzione della capacità portante, ma l'impatto di masse in movimento e la pressione dinamica del flusso a produrre meccanismi di crollo nella struttura intelaiata, a causa della formazione di cerniere plastiche all'estremità o al centro delle colonne.

L'analisi e l'interpretazione del danno strutturale ha consentito di identificare alcune tipologie di meccanismo di collasso per gli edifici in c.a. e in muratura che permettono di valutare la capacità portante ultima dei singoli elementi e/o della struttura complessiva. Il confronto tra la capacità portante ultima e la pressione di idrostatica/idrodinamica prodotta dall'impatto del flusso ha consentito di valutare la velocità di impatto.

Nei modelli idrodinamici, si è fatta l'ipotesi di una corrente fluida di densità continua, mentre si è trascurata la possibile presenza di masse concentrate, quali alberi, pietre e altro materiale trasportato.

Dall'osservazione del danno sono stati individuati i seguenti possibili meccanismi (Figura 3.31):

- *Edifici in cemento armato*
 - crollo delle tamponature in mattone, senza danno agli elementi strutturali (Figura 3.31a);
 - formazione di tre cerniere plastiche: meccanismo di collasso delle colonne, senza collasso globale (Figura 3.31b);

- meccanismo di collasso a taglio delle colonne, con spostamento delle parti dell'edificio (Figura 3.31c).
- formazione di cerniere plastiche: meccanismo di collasso delle colonne, con la formazione del meccanismo di piano a pianterreno, producendo il fallimento della struttura intera (Figura 3.31d);
- *Edifici di muratura*
 - meccanismo di pannello, con la formazione di tre cerniere plastiche nel pannello verticale (Figura 3.31e).

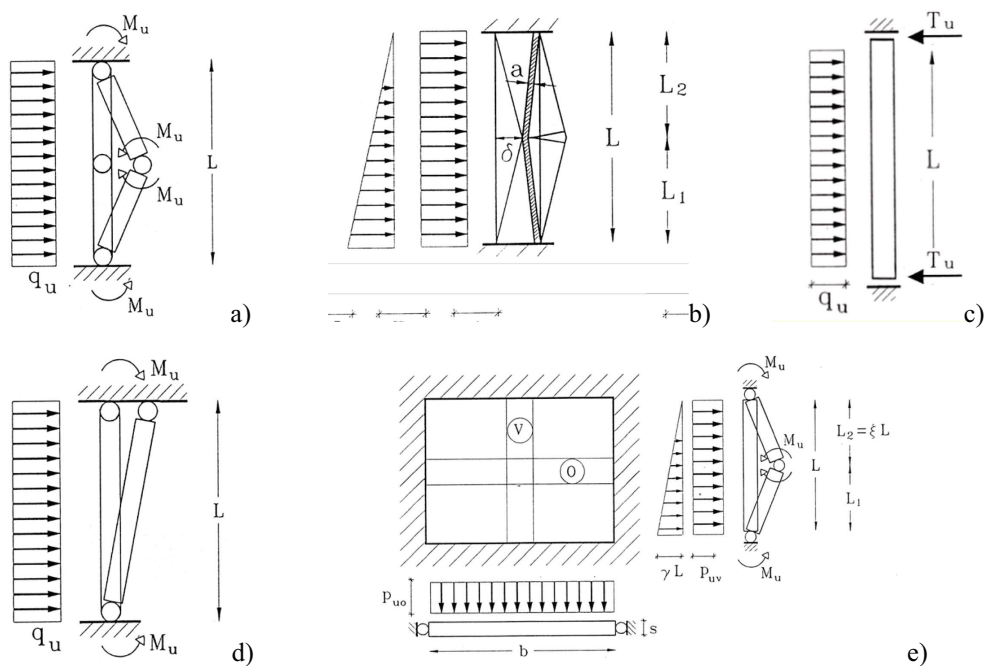


Figura 3. 32. Modelli per frane: a) crollo dei muri esterni in mattone – meccanismo ad arco; b) meccanismo di collasso delle colonne in c.a. per formazione di tre cerniere plastiche; c) meccanismo di collasso per taglio delle colonne in c.a.; d) meccanismo di collasso delle colonne in c.a. del piano terra per formazione di due cerniere plastiche; e) meccanismo resistente dei pannelli in muratura (Faella & Nigro, 2002).

L'analisi dei risultati ha indicato che: velocità di flusso relativamente basse ($< 5 \div 6 \text{ m/s}$), anche in regime di idrostatico, possono produrre il crollo di edifici di muratura; velocità basse (approssimativamente di 3 m/s) costituiscono le cause del crollo delle tamponature degli edifici in c.a.;

impatti frontali con velocità di flusso di circa 10m/s possono provocare il crollo di edifici in c.a., a causa del meccanismo di piano per la formazione di due cerniere plastiche; una velocità di flusso compresa tra i 15 e i 20m/s può produrre il collasso delle sole colonne, con la formazione di tre cerniere plastiche.

Sulla base di queste indicazioni è stato possibile studiare delle raccomandazioni speciali che dessero orientamenti tecnici per la realizzazione di nuove costruzioni nelle aree a rischio. I nuovi edifici devono essere progettati in modo da resistere al flusso di frammenti, quantificando le azioni sulla base della velocità di impatto. Con questo scopo, l'area interessata è stata suddivisa in tre zone diverse, sulla base dei valori attesi di velocità di flusso e pressione corrispondente (Tabella 3.10). E' interessante osservare che tali azioni possono essere più forti delle normali azioni di progetto per terremoto.

Tabella 3. 10. Zone a rischio, in riferimento alla velocità attesa ed alla relativa pressione idrodinamica (Faella e Nigro, 2002).

ZONA A RISCHIO		VELOCITÀ ATTESA	PRESSIONE IDRODINAMICA
		[m/s]	[kN/m ²]
A.	Alto	10	150
B.	Medio	7	73,5
C.	Basso	5	37,5

Vallario (1994), in alcuni studi effettuati sugli alvei del Monte Somma e del versante vesuviano, ha calcolato la spinta che una colata di materiale piroclastico può imprimere su cose o persone, tenendo conto di eventi pluviometrici con ritorno di 5, 10, 30, 50 e 100 anni, ed utilizzando la formula di Gaukler-Strickler per il calcolo della velocità di scorrimento dell'acqua, e di Meyer-Peter per il calcolo del trasporto solido. Le analisi sono stati eseguite per sezioni di sbocco poste a diverse quote dell'alveo Cavallo (Torre del Greco, versante meridionale del vulcano). I risultati ottenuti da Vallario mostrano come, già per eventi con ritorno di 5 anni, la spinta esercitata da una corrente di acqua e materiale piroclastico (pari a 252kg) a quota 500m.s.l.m. è sufficiente a far cadere una persona posta in piedi. Se consideriamo sezioni di sbocco a quote inferiori la spinta aumenta ulteriormente fino a 1000kg ad altezza di circa 75m. In Tabella 3.12 vengono riportati i dati ottenuti dai calcoli effettuati sull'alveo del Cavallo, per diversi tempi di ritorno e per diverse quote. A questo punto è evidente il rischio a cui vanno in contro

persone e beni immobili se colpiti da una colata di fango, rischio che diventa progressivamente più elevato man mano che si procede verso quote più basse, in prossimità degli sbocchi terminali degli alvei, ubicati generalmente tra i 200 ed i 70m.

Le velocità calcolate da Vallario sono comparabili con quelle ricavate negli studi fatti a Sarno (Tabella 3.11), e per quanto riguarda i valori della spinta in corrispondenza delle stesse velocità, essi possono ritenersi simili con un'approssimazione del 5%. Sulla base di tale considerazioni si rende possibile l'assunzione dei risultati dell'analisi di Faella e Nigro (2002) al caso dei lahar vesuviani.

Tabella 3. 11. Effetti di una colata piroclastica vesuviana. Analisi eseguite per l'Alveo Cavallo a Torre del Greco (Vallario, 1994).

		T	Altitudine della sezione [m]					
		[anni]	100	200	300	400	500	600
Velocità del flusso	[m/s]	5	7.69	7.59	7.13	6.43	5.00	3.94
Trasporto solido	[t/s]		71.49	74.58	62.96	44.17	15.23	5.58
Spinta	[kg]		1171	873	625	428	252	149
Velocità del flusso	[m/s]	10	8.37	8.28	7.79	7.03	5.47	4.31
Trasporto solido	[t/s]		97.24	100.92	84.91	59.45	20.51	7.52
Spinta	[kg]		1513	1131	811	556	327	194
Velocità del flusso	[m/s]	30	9.28	9.22	8.69	7.86	6.10	4.80
Trasporto solido	[t/s]		143.2	147.53	123.58	86.29	29.79	10.93
Spinta	[kg]		2077	1559	1120	769	452	267
Velocità del flusso	[m/s]	50	9.66	9.61	9.07	8.20	6.37	5.01
Trasporto solido	[t/s]		167.02	171.55	143.41	100.03	34.56	12.68
Spinta	[kg]		2352	1768	1271	873	513	303
Velocità del flusso	[m/s]	100	10.14	10.11	9.55	8.64	6.71	5.27
Trasporto solido	[t/s]		201.92	206.58	172.28	119.94	41.46	15.21
Spinta	[kg]		2739	2063	1485	1020	599	354

3.8. GLI TSUNAMI

3.8.1. Fenomeno

Con il termine giapponese *tsunami* (onda- *nami*- nel porto- *tsu*) di Figura 3.33a, si indica una serie di onde che, superando l'abituale linea costiera, provocano danni all'interno dei porti, ma anche lungo tutta la costa e a volte nell'entroterra. La parola italiana usata per definire uno tsunami è *maremoto*.

L'origine di uno tsunami è legata alla liberazione di una fortissima energia che causa lo spostamento di una grande quantità d'acqua, dunque, essa non va ricercata solamente nei fenomeni sismici: in generale si può affermare che qualunque causa in grado di perturbare verticalmente una colonna d'acqua sufficientemente grande, muovendola dalla sua posizione di equilibrio, è in grado di originare uno tsunami; dunque possono a pieno titolo diventare causa di tsunami anche eruzioni vulcaniche, esplosioni, frane e movimenti tettonici sottomarini. A queste cause di origine terrestre ne va aggiunta anche una esterna, costituita dal possibile impatto con oggetti cosmici.

Le onde che si osservano abitualmente sono prodotte dal vento e muovono solamente la parte più superficiale dell'acqua non provocando alcun movimento in profondità (Figura 3.33b). Le onde di tsunami, invece, muovono tutta la colonna d'acqua, dal fondale alla superficie, ed è per questo che hanno una forza d'impatto sulla costa molto maggiore e sono in grado di avanzare per molte centinaia di metri nell'entroterra. Viaggiano ad elevata velocità in mare aperto, sono in grado di propagarsi per migliaia di chilometri e possono abbattersi con eccezionale energia anche su coste molto lontane dal punto di origine (Figura 3.33c).

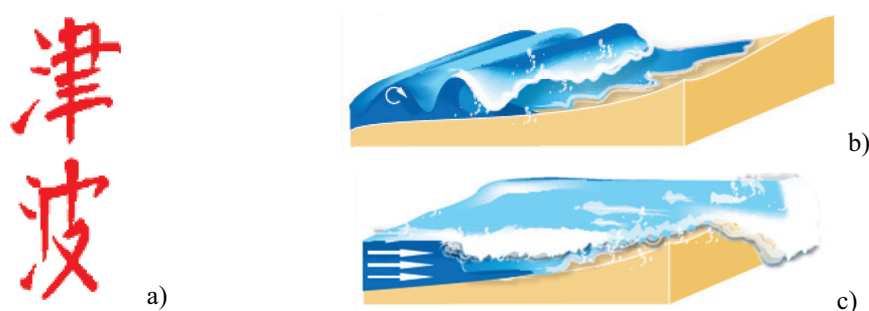


Figura 3. 33. a) Ideogramma della parola giapponese *tsunami*. B) Onde prodotte dal vento: muovono solamente la parte superficiale dell'acqua. c) Onde di tsunami: muovono tutta la colonna d'acqua dal fondale alla superficie.

Da un punto di vista fisico, le onde di maremoto sono caratterizzate da lunghezze d'onda, distanza tra due creste, molto elevate, dell'ordine delle decine o centinaia di chilometri, quindi molto grandi rispetto alla profondità dell'acqua in cui viaggiano, anche in aperto oceano. Questa caratteristica fa sì

che le onde di maremoto si comportino come “onde in acque basse” (*shallow water waves*).

Queste onde viaggiano ad elevata velocità in mare aperto, raggiungendo anche i 700÷800km/h e sono in grado di propagarsi per migliaia di chilometri, conservando pressoché inalterata la loro energia ed essendo quindi in grado di abbattersi con eccezionale violenza anche su coste molto lontane dal punto di origine.

La velocità v di propagazione delle *shallow-water waves* è:

$$v = \sqrt{g \cdot d} \quad (3.24)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità ($9,8\text{m/s}^2$) e d è la profondità del fondo marino espressa in metri (Figura 3.34). In prossimità delle coste, dove i fondali sono meno profondi, l'onda rallenta la sua corsa. Ciò provoca l'aumento dell'altezza d'onda, concentrandosi la sua energia in uno strato d'acqua molto più piccolo.

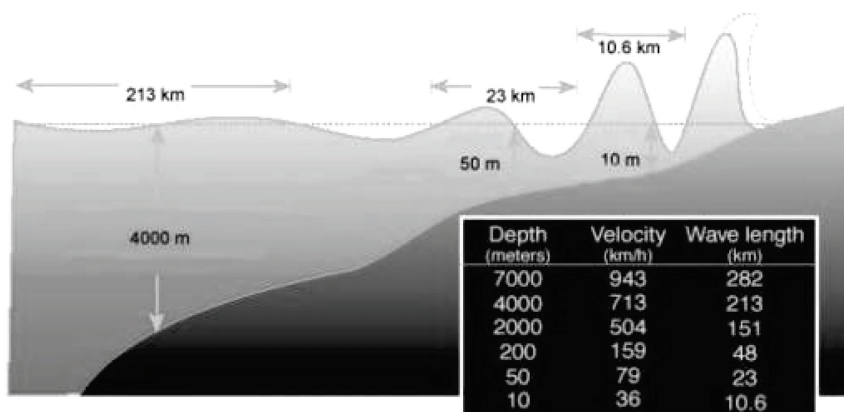


Figura 3. 34. Comportamento dell'onda di maremoto. Al diminuire della profondità del mare, diminuiscono anche la velocità e la lunghezza d'onda, mentre l'altezza dell'onda aumenta (www.globalsecurity.org).

Per stabilire l'intensità di uno tsunami si utilizza la scala *Sieberg-Ambraseys* (introdotta nel 1927 da August Sieberg e poi modificata da Nicholas Ambraseys nel 1962) adottata anche nei cataloghi europei. Essa prevede i seguenti sei gradi di intensità.

- I. MOLTO DEBOLE. Onda percettibile solo dai mareografi.
- II. DEBOLE. Onda avvertita da persone che vivono vicino alla spiaggia e hanno familiarità col mare. Osservata solo su spiagge molto piatte.
- III. ABBASTANZA FORTE. Onda avvertita da tutti. Inondazione di coste a dolce pendenza. Piccole imbarcazioni spinte sulla spiaggia. Modesti danni alle strutture leggere vicino alla costa. Negli estuari inversione della corrente dei fiumi.
- IV. FORTE. Inondazione delle spiagge fino ad una altezza definita caso per caso. Leggera erosione dei terreni non consolidati. Danni alle strutture leggere prossime alla riva. Piccoli danni alle strutture in muratura sulla costa. Insabbiamento di imbarcazioni o loro trascinarsi al largo. Detriti galleggianti lungo le coste.
- V. MOLTO FORTE. Inondazione delle spiagge fino a una altezza definita nelle diverse zone. Danni significativi alle strutture in muratura lungo la spiaggia. Distruzione delle strutture leggere. Forte erosione. Oggetti galleggianti e animali marini sparsi sulla riva e lungo la costa. Tutti i tipi di imbarcazione, a parte le grandi navi, sono scaraventate a terra o trascinate in mare aperto. Alte ondate sugli estuari dei fiumi. Danni alle costruzioni portuali. Persone affogate. Onda accompagnata da un forte rombo.
- VI. DISASTROSO. Totale o parziale distruzione di tutte le costruzioni fino a una determinata distanza dalla spiaggia. Inondazione della costa fino a una notevole altezza. Danni forti anche alle grandi navi. Alberi sradicati e troncati. Molte vittime.

Fortunatamente i maremoti sono rari. Uno dei più catastrofici è quello avvenuto il 26 Dicembre 2004 nel Sud-Est Asiatico (Oceano Indiano). Anche il Mediterraneo è stato interessato nei secoli da eventi di *tsunami*, sia distruttivi che di minore entità, principalmente lungo le coste della Grecia e dell'Italia. Il maremoto in assoluto più devastante è stato quello prodotto dal collasso della caldera del vulcano Santorini, circa nel 1400a.C. con onde stimate tra 50÷90m di altezza. Il maremoto si propagò con una velocità di oltre 300km/h e in pochi minuti raggiunse le coste della Turchia meridionale. Meno di tre ore dopo la Siria, l'Egitto e la Palestina furono devastati dalle onde. Questo evento è ritenuto essere la possibile causa della scomparsa della

civiltà minoica. Per quanto riguarda le coste italiane, il maremoto più disastroso è quello seguito al terremoto di Messina del dicembre 1908. Il terremoto distrusse totalmente le città di Messina e Reggio Calabria ed un violento *tsunami* seguì la scossa principale, causando ingenti danni e centinaia di vittime, con onde che raggiunsero i 13m di altezza sulle coste calabre, a Pellarò e 11,70m a S.Alessio, sulle coste della Sicilia. L'ultimo maremoto italiano è quello avvenuto a Stromboli (Isole Eolie) il 30 Dicembre 2002, causato dallo scivolamento (prevalentemente sottomarino) di un enorme massa di materiale vulcanico dalla Sciara del Fuoco (Figura 3.35). Le onde, che a Stromboli hanno raggiunto 11 metri di altezza, hanno prodotto danni ingenti e si sono propagate fino a Ustica, Sicilia settentrionale e coste campane.



Figura 3. 35. Immagini riprese durante lo tsunami abbattutosi sull'isola di Stromboli nel Dicembre 2002.

Nei mari europei i tempi di tragitto dell'onda dalla sorgente del maremoto alla costa sono relativamente brevi, generalmente non superiori a 30 minuti. Questo tempo è ancora minore per i maremoti del Mediterraneo e dell'Italia in

particolare, dove solitamente le onde colpiscono le coste solo una decina di minuti dopo il verificarsi della scossa. Questo perché la maggior parte dei terremoti *tsunamigenici* si verificano in mare a poca distanza dalla costa o addirittura in terra molto vicino alla costa. L'Italia è zona potenzialmente soggetta agli *tsunami*, non fosse altro che per la sua posizione peninsulare e per l'alta sismicità di alcune regioni.

Nell'ambito del progetto finanziato da GNDT/INGV (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), è stato realizzato un Catalogo degli Tsunami Italiani (ITC). Esso copre un intervallo temporale di circa 2000 anni, a partire dal maremoto associato all'eruzione Pliniana del Vesuvio del 79d.C, fino ad oggi, per un totale di 72 eventi. Il catalogo ITC, risultato di una approfondita analisi delle fonti storiche ed aggiornato periodicamente, è in forma di database implementato con Visual FoxPro 6.0 DBMS (Tinti et al., 2007), allo scopo di rendere disponibile un prodotto di facile utilizzo. Il database offre una tabella nella quale ad ogni evento corrisponde una singola riga, composta da 20 campi, nei quali sono riportate le seguenti informazioni:

1. *CODICE*, un numero intero che identifica in modo univoco l'evento in ogni sezione del catalogo.
- 2-6. *DATA EVENTO* che comprende anno, mese, giorno, ora minuti, secondi in cui si è verificato l'evento che ha originato il maremoto (terremoto, eruzione vulcanica, ecc.).
7. *ATTENDIBILITÀ DATA* dell'evento in anni.
8. *SOTTOREGIONE*, è l'area geografica in cui l'evento è stato originato. Lungo le coste italiane sono state identificate 15 sottoregioni, che non sono delimitate da precise coordinate geografiche ma piuttosto corrispondono vagamente a denominazioni scelte per delineare le principali aree sorgenti di maremoti (Figura 3.36).
9. *DESCRIZIONE*, ossia una breve stringa di testo che riporta i fenomeni più rilevanti, con particolare attenzione ai ritiri delle acque e alle inondazioni, specificando le più importanti località colpite.



Figura 3. 36. Sottoregioni italiane tsunami geniche (Tinti et al., 2007).

10. *ATTENDIBILITÀ EVENTO*, un numero compreso tra 0 e 4, che corrisponde a classi di probabilità crescente che l'evento sia uno tsunami. La scala di riferimento adottata è: 0= maremoto molto improbabile, 1= maremoto improbabile, 2= maremoto dubbio, 3= probabile maremoto, 4= maremoto certo.
11. *CAUSA*, è un codice di due lettere che specifica la causa dell'evento generante e, più precisamente: EA= sisma a terra, ER= sisma in mare; EL= frana in terra; ES= frana sottomarina; VA= eruzione vulcanica a terra, VO= eruzione vulcanica sottomarina; VL= frana da eruzione; VS= frana da eruzione sottomarina; GL= frana subaerea; GS= frana sottomarina; UN= causa sconosciuta.
- 12-13. *COORDINATE EVENTO*, sono le coordinate geografiche dell'evento che ha causato il maremoto.
14. *INTENSITÀ MACROSISMICA*, ossia la massima intensità attribuita al sisma, sulla base della Scala Mercalli-Cancani-Sieberg in XII gradi, specificata solamente quando la causa è un terremoto.
15. *MAGNITUDO TERREMOTO*, cioè la magnitudo Richter del sisma generante.
16. *PROFONDITÀ FOCALE* del sisma generante.

17. *VEI*, ossia Volcanic Explosivity Index, un valore rappresentativo dell'entità dell'eruzione vulcanica generante, sulla scala proposta da Simkin (1981).
18. *RUNUP*, cioè la massima altezza (in cm) raggiunta dall'onda di maremoto sulla costa.
19. *TSU-INT*, ossia l'intensità del maremoto, sulla base della scala proposta da Ambraseys (1962), divisa in 6 gradi, che misura l'entità del maremoto in base agli effetti prodotti sulle persone, sull'ambiente e sulle strutture.
20. *MAGNITUDO TSUNAMI* valutata in accordo con la scala di Murty-Loomis:

$$ML=2(\log E-19) \quad (3.25)$$

ove E è l'energia potenziale totale, in erg, dell'onda nell'istante di generazione.

Con riferimento all'analisi di un possibile tsunami legato ad eruzione vulcanica vesuviana, il Catalogo degli Tsunami Italiani fornisce tutti i maremoti verificatisi nella sottoregione Campania a partire dal 79d.C. (Tabella 3.14).

Tsunami associati all'attività del Vesuvio sono rari. Secondo i documenti storici, nel Golfo di Napoli (Figura 3.37), mar Tirreno, sono state osservate delle oscillazioni anomale del mare, non solo in concomitanza delle eruzioni più grandi (79d.C. e 1631), ma anche nel caso di alcuni degli eventi più piccoli, come il 14 maggio 1698, 17 maggio 1813 e aprile 1906. Lo tsunami del 79d.C. fu descritto nella seconda lettera di Plinio il Giovane e si verificò il 25 agosto, la mattina del secondo giorno di eruzione: il mare si ritirò lasciando molti pesci ed animali marini sul fondale ormai asciutto. Maggiori notizie, invece, sono disponibili per lo tsunami causato nel 1631. Anche questo evento ebbe luogo nella seconda giornata dell'eruzione, il 17 dicembre: il mare si ritirò per 1000-2000m nella parte sud del Golfo di Napoli, e per diverse decine di metri sulla costa settentrionale, e di conseguenza il suo livello si abbassò di alcuni metri; seguirono delle inondazioni costiere che, secondo alcune fonti, si ripeterono per almeno tre volte, causando danni ad imbarcazioni e navi. Lo tsunami del 1631 ebbe luogo durante una fase in cui si verificarono dei flussi piroclastici, ed era assente qualsiasi attività sismica. Questi flussi, molto

abbondanti e disastrosi, entrarono in mare a Torre Annunziata, Torre del Greco e Granatello (Figura 3.37) in forma di materiale ad alta densità formando piccole penisole. I meccanismi tsunamigenici degli eventi verificatisi nella zona vesuviana non sono certi. Essi possono essere attribuiti allo spostamento dei fondali determinati dai terremoti che accompagnano l'attività vulcanica, alla rapida inflazione o deflazione dei fianchi del vulcano che coinvolgono il fondo marino dell'area del Golfo di Napoli o ai flussi piroclastici che giungono fino al mare.

Tabella 3. 12. Tsunami verificatisi nella sottoregione Campania dal 79d.C. (Tinti et al., 2007).

CODICE	ANNO	MESE	GIORNO	ORA	ATTENDIBILITÀ DATA	SOTTOREGIONE	DESCRIZIONE	ATTENDIBILITÀ EVENTO	CAUSA	COORD_N	COORD_E	INTENSITÀ MACROSCISMICA	MAGNITUDO SISMA	VEI	RUNUP	INTENSITÀ TSUNAMI
1	79	8	24		2	CAMPANIA	Ritiro nel Golfo di Napoli	2	VA	40.49	14.26			5		2
2	1112	6	20				Ritiro di 200 piedi	2	UN							2
9	1631	12	17	9			Ritiro nel Golfo di Napoli	4	VA	40.49	14.26			4		2
16	1698	5	14	10			Ritiro nel Golfo di Napoli	2	VA	40.49	14.26			3		2
19	1714	6	30				Ritiro nel Golfo di Napoli	0	VA	40.49	14.26			2		2
25	1760	6	16	15			Ritiro a Portici	2	ER	40.51	14.16	6	4.3			2
33	1805	7	26	21			Aumento del livello del mare nel Golfo di Napoli	4	EA	41.30	14.28	10	6.6			2
36	1813	5	17				Ritiro nel Golfo di Napoli	1	VA	40.49	14.26			2		2
45	1847	8	26				Abbassamento del livello del mare a Napoli	0	UN							2
52	1906	4	4		4		Oscillazioni del mare nel Golfo di Napoli	4	VA	40.49	14.26			3		2

Il Golfo di Napoli può essere visto come una vasca rettangolare allungata in direzione SW-NE, lunga 40km e larga 25km circa, abbracciata da quattro parti. Dal lato nord è presente un lungo segmento che comprende le isole di

Ischia e Procida, il promontorio di Capo Miseno, le coste dei Campi Flegrei fino al porto di Napoli; il secondo lato, da Napoli a Castellammare di Stabia, è un piano continentale caratterizzato da una costa bassa; il terzo lato è costituito dalla costa alta della penisola di Sorrento e continua fino al mare aperto e all'isola di Capri; l'ultimo tratto è quello che collega idealmente Capri ad Ischia. Il golfo è poco profondo, con i più bassi gradienti batimetrici nell'angolo sud-est, alla base del penisola sorrentina, in prossimità di Castellammare di Stabia. La maggior parte del fondo del mare si trova tra i 100 e 200m di profondità. Nella zona del bacino lontana dalla costa è presente un brusco passaggio da 200m fino a 500m profondità a causa di un rilievo situato nel fondo del mare a metà distanza tra le isole di Ischia e Capri (Figura 3.37).

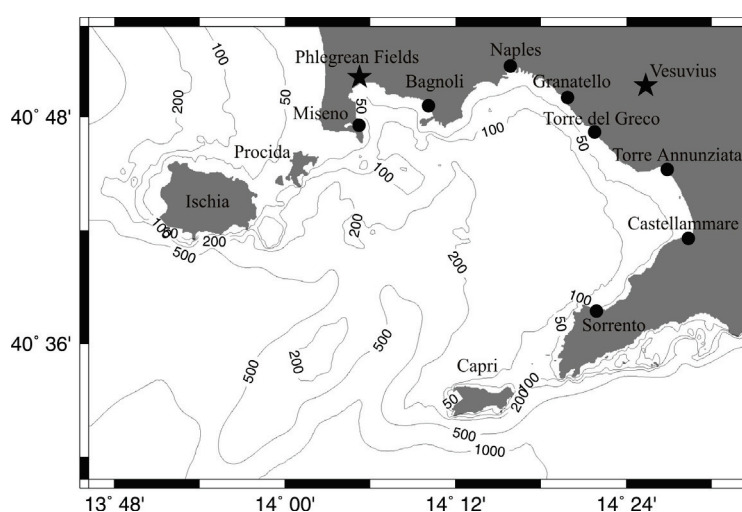


Figura 3. 37. Mappa batimetrica del Golfo di Napoli con isobate in m (Tinti et al., 2003).

Tinti et al. (2003) hanno studiato l'eccitazione e la propagazione di uno tsunami nel Golfo di Napoli. Sono state effettuate delle simulazioni di tsunami verificatisi per effetto di flussi piroclastici connessi a grandi eruzioni vesuviane, supponendo che tali flussi possano viaggiare per distanze notevoli sulla superficie del mare. Il sovraccarico associato al loro movimento è stato modellato come un impulso di pressione in grado di produrre onde d'acqua. Lo tsunami generato è stato simulato mediante un modello agli elementi finiti. Le oscillazioni derivanti dalle simulazioni risultano essere più grandi nel

golfo e quasi trascurabili al di fuori di esso, ma sempre con ampiezze molto ridotte. In Figura 3.38 sono indicati, per diversi istanti dall'inizio del tsunami simulato, la pressione esercitata dai flussi e le conseguenti variazioni del livello del mare.

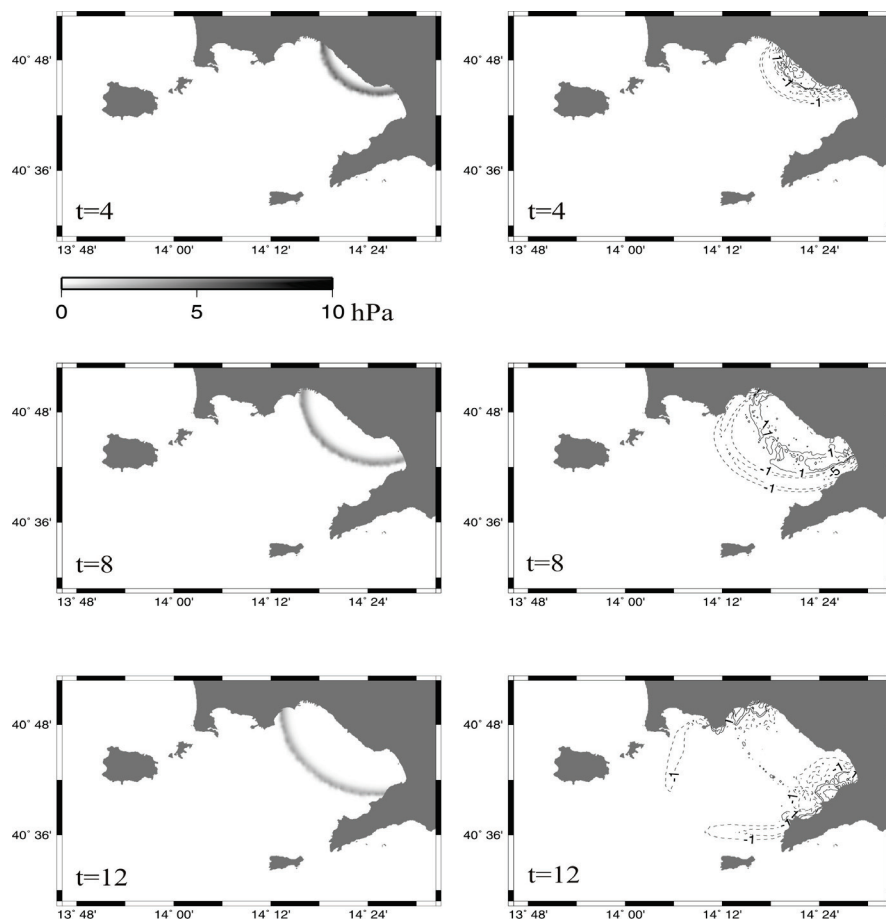


Figura 3. 38. Simulazione di uno tsunami nel Golfo di Napoli prodotto dall'ingresso in acqua di flussi piroclastici vesuviani. A sinistra sono riportate le pressioni. A destra sono indicati i campi di elevazione dell'acqua (cm), calcolati negli stessi istanti di tempo. Il tempo è misurato dall'origine dello tsunami, non dall'inizio dell'eruzione. Curve di altezza: linee continue = positivo; linee tratteggiate = negativo. (Tinti et al., 2003).

Quello che si evince è che per pressioni che raggiungono i 10hPa, il livello del mare non raggiunge mai incrementi superiori ai 40cm, come meglio

evidenziato dagli andamenti riportati in Figura 3.39 per le diverse stazioni costiere esaminate.

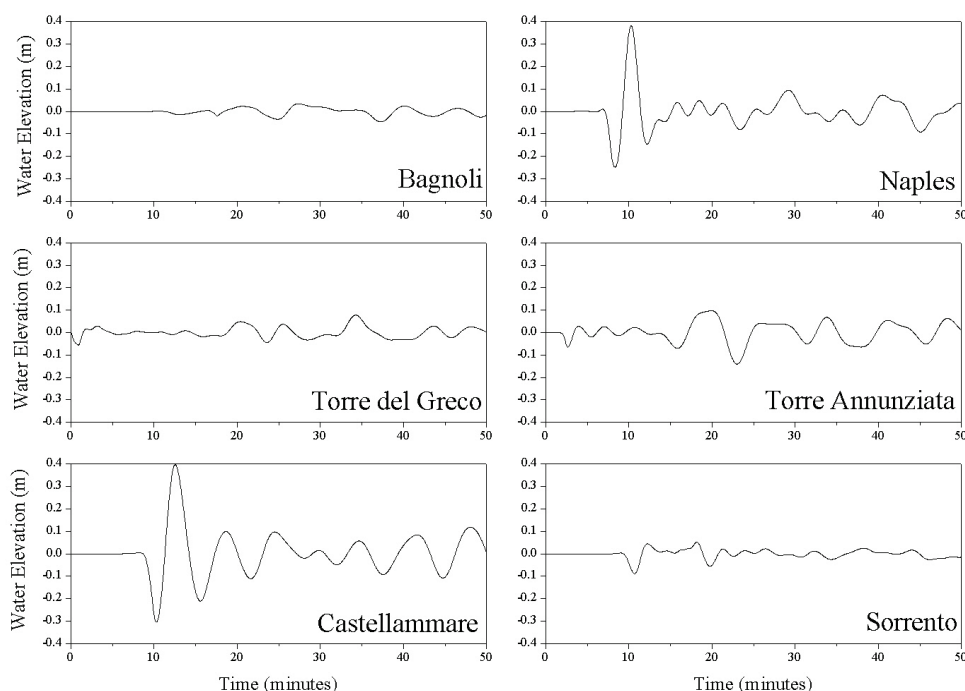


Figura 3. 39. Andamento del livello del mare per diverse stazioni costiere (Tinti et al., 2003).

3.8.2. Azione ed effetti sul costruito

L'azione esercitata da uno tsunami su una costruzione investita può essere schematizzata attraverso due spinte consecutive (Palermo et al., 2007): la prima dovuta all'impatto iniziale dell'onda, la seconda relativa alla fase post-impatto (Figura 3.40).

L'impatto iniziale è prodotto dal fronte d'onda (F_s) e dai frammenti trasportati (F_i).

Il post-impatto, invece, è caratterizzato dall'impatto dei frammenti (F_i), dall'azione di trascinamento (F_D) e dalla pressione idrostatica dell'acqua (F_{HS}).

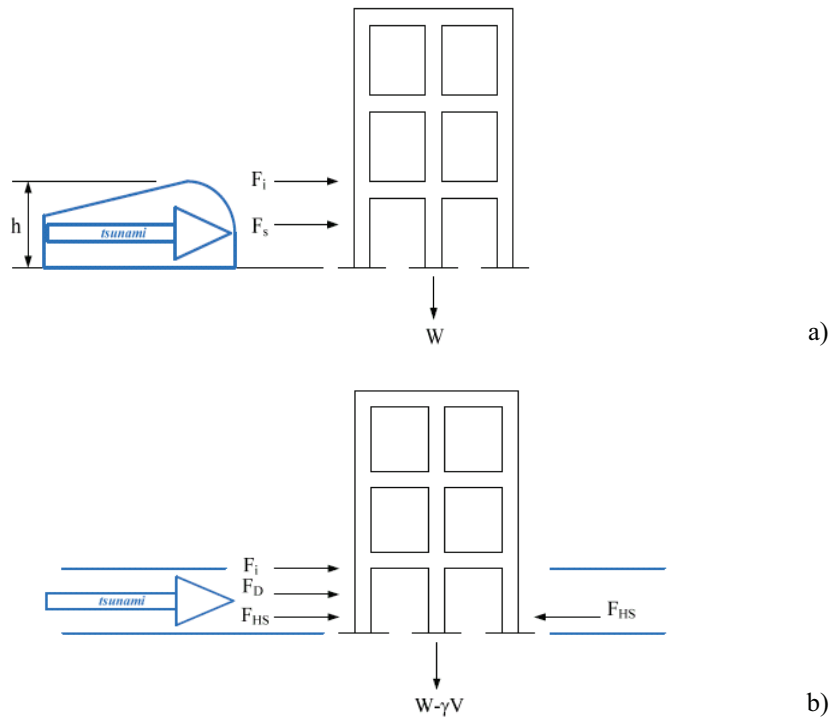


Figura 3. 40. Carichi prodotti da uno tsunami: a) impatto iniziale; b) post- impatto (Palermo et al., 2007).

Le azioni suddette valgono:

$$\begin{aligned}
 F_s &= 4,5 \rho g h^2; \\
 F_i &= m \frac{u_l}{\Delta t}; \\
 F_D &= \frac{\rho C_D A u^2}{2}; \\
 F_{HS} &= \frac{1}{2} \rho g \left(d_s + \frac{u_p^2}{2g} \right)
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

dove: ρ è la densità; g è l'accelerazione di gravità; h l'altezza del fronte d'onda; m la massa dei frammenti trasportati; u la velocità del flusso; d_s il livello di inondazione.

I valori da inserire nelle relazioni (3.26) sono offerti dalla normativa di Honolulu (CCH) e dal Manuale delle costruzioni litoranee dell'Agenzia per la Gestione delle Emergenza Federali (FEMA 55):

- Impatto frammenti trasportati (F_i):

$$m = 445kg ; \quad \Delta t = \begin{cases} 0,1s & (CCH) \\ 0,2 \div 0,6s & (FEMA 55) \end{cases} \quad (3.27)$$

I valori di Δt si riferiscono ad edifici in c.a.

- Azione di trascinamento (F_D):

$$u = \begin{cases} d_s & (CCH) \\ 2\sqrt{gd_s} & (FEMA 55) \end{cases} ; \quad C_D = \begin{cases} 1,0 & (CCH) \\ 1,2 & (FEMA 55) \end{cases} \quad (3.28)$$

L'andamento della velocità u del flusso in relazione al livello di inondazione d_s (3.28) è indicato in Figura 3.41.

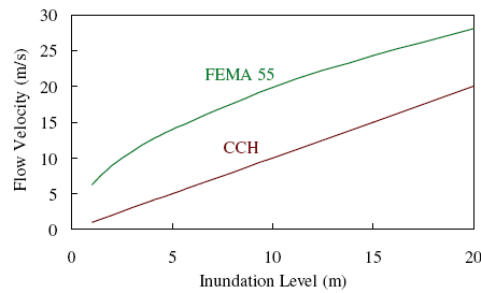


Figura 3. 41. Variazione della velocità del flusso u , con il livello di inondazione d_s .

Lo tsunami del 26 dicembre 2004 che ha devastato il Sud-Est Asiatico ha fornito un'occasione unica per valutare gli effetti di uno tsunami sulle strutture colpite.

Ciò che è apparso maggiormente evidente è quanto i detriti trasportati dalla corrente producano un aumento del potere distruttivo di uno tsunami. Le onde anomale sono riuscite a smuovere alberi, autovetture, barche e far arrivare i

detriti fino al secondo piano degli edifici con un'energia tale da abbattere colonne in c.a. o pareti in muratura (Figura 3.42a). Ingenti danni sono stati provocati anche a strutture ed infrastrutture speciali, come ponti, serbatoi e banchine portuali (Figura 3.42b).



Figura 3. 42. Danni prodotti dallo tsunami che ha investito il sud-est asiatico il 26 dicembre 2004 a strutture (a) ed infrastrutture (b) (Ghobaraha et al., 2006).

3.9. COMBINAZIONE DELLE AZIONI

In caso di eruzione, la combinazione delle azioni agenti su una struttura investita è quella denominata “eccezionale” dalle NTC 2008:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k1} + \dots \quad (3.29)$$

dove: G_1 è l'aliquota di carico permanente dovuto agli elementi strutturali; G_2 è l'aliquota di carico permanente dovuto agli elementi non strutturali; P è l'azione di pretensione o precompressione; A_d rappresenta le azioni eccezionali; Q_{ki} sono le azioni variabili; ψ_{2i} sono i coefficienti di combinazione delle azioni variabili (Tabella 3.13)

Tabella 3. 13. Valori dei coefficienti di combinazione (NTC, 2008).

Categoria	ψ_{2i}
Ambienti ad uso residenziale	0,3
Uffici	0,3
Ambienti suscettibili di affollamento	0,6
Ambienti ad uso commerciale	0,6
Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0,8
Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $\leq 30\text{kN}$)	0,6
Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso $> 30\text{kN}$)	0,3
Coperture	0,0
Vento	0,0
Neve (a quota $\leq 1000\text{m s.l.m.}$)	0,0
Neve (a quota $\leq 1000\text{m s.l.m.}$)	0,2
Variazioni termiche	0,0

Le azioni eccezionali A_d prodotte da un evento vulcanico sono dovute a: depositi da caduta (A_{AF}); flussi piroclastici (A_{PF}); missili vulcanici (A_{VM}); terremoti vulcanici (A_{EQ}); lahar (A_{LH}); e tsunami (A_T).

Durante un'eruzione, però, esse non agiscono contemporaneamente, ma possono essere suddivise in tre diverse fasi temporali:

- Prima dell'eruzione, si verificano terremoti vulcano-tettonici di intensità medio alta.
- Durante l'eruzione, si verificano caduta di ceneri ed esplosione di missili vulcanici. Terremoti di bassa intensità accompagnano l'eruzione, ma potrebbe verificarsi anche un sisma di alta magnitudo dovuto al collasso della caldera.
- Dopo l'eruzione, terremoti di bassa intensità si accompagnano alla formazione di flussi piroclastici, lahar e tsunami.

Di conseguenza, la relazione (3.29) può essere scissa in tre aliquote, relative alle tre fasi temporali, prima, durante e dopo l'eruzione, rispettivamente:

$$G_1 + G_2 + P + A_{EQ} + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k1} + \dots \quad (3.30)$$

$$G_1 + G_2 + P + A_{EQ} + A_{AF} + A_{VM} + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k1} + \dots \quad (3.31)$$

$$G_1 + G_2 + P + A_{EQ} + A_{PF} + A_{LH} + A_T + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k1} + \dots \quad (3.32)$$

In nessuna di queste relazioni compare l'azione eccezionale prodotta delle lave, perché nel caso di questo fenomeno, le velocità in atto sono tali da consentire di intervenire deviando, contenendo, raffreddando o interrompendo i flussi, prima che questi raggiungano le costruzioni.

Con riferimento all'area vesuviana, in Figura 3.43, è indicata la *time history* di una probabile eruzione sub-pliniana del Vesuvio, determinata attraverso le simulazioni effettuate nel progetto EXPLORIS.

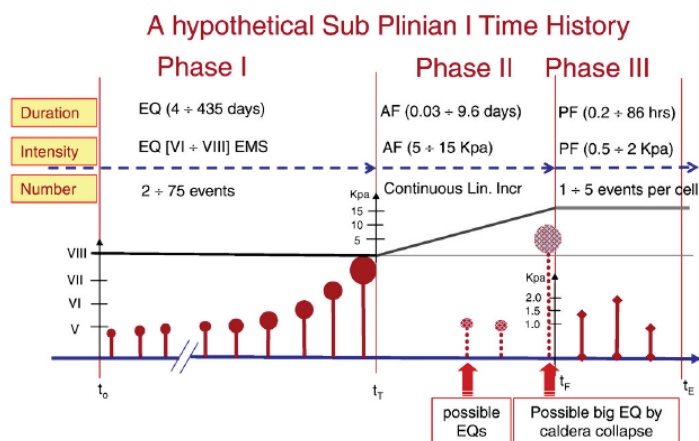


Figura 3. 43. Probabile *time history* di un'eruzione vesuviana sub-pliniana (Zuccaro et al., 2008).

Il probabile susseguirsi degli eventi eruttivi prende in considerazione soltanto tre fenomeni: terremoti (EQ), depositi da caduta (AF) e flussi piroclastici (P). Essi si susseguono nella maniera seguente:

- Prima dell'eruzione, sono previsti da 2 a 5 terremoti di intensità VII-VIII (EMS, 1998).

Durante l'intera eruzione è prevista una continua attività sismica di bassa intensità ($< V$), mentre durante la sola fase dei depositi da caduta, sono attesi alcuni eventi discreti di breve durata (20-40 s) e di bassa intensità (V-VI EMS).

I terremoti vesuviani potranno interessare l'intera zona rossa del Piano di emergenza della Protezione Civile (Figura 2.14).

- Durante l'eruzione, i depositi da caduta sono continui. Essi interesseranno prima la sola area rossa, per poi estendersi all'area gialla e successivamente alle aree esterne ad essa.
- Alla fine della fase degli *ash fall*, avranno inizio una serie di flussi piroclastici discreti della durata di 3-4 minuti ciascuno, distribuiti in modo casuale durante la fase finale dell'eruzione.

L'area interessata potrebbe essere l'intera area rossa, anche se il maggiore impatto dannoso si concentrerà in una fascia di 150-500m di larghezza.

Nella simulazione di EXPLORIS non compaiono lahar e tsunami. Questi ultimi, in realtà, sono effettivamente trascurabili per l'area vesuviana (Tinti et al., 2003), mentre i lahar potranno generarsi a termine dell'eruzione, probabilmente a seguito di piogge, e interessare l'intera area rossa, anche se la zona a maggior rischio è la piana di Nola.

Metodologie per l'analisi di vulnerabilità

4.1. VULNERABILITÀ SISMICA

4.1.1 *Metodi di valutazione della vulnerabilità sismica*

La letteratura scientifica relativa ai metodi di valutazione della vulnerabilità vulcanica è piuttosto scarsa. Dunque, allo scopo potersi riferire ad approcci già consolidati, l'analisi della filosofia dei numerosi metodi adottati in campo sismico è senz'altro di aiuto. A tal proposito, nel seguito, si è riportata una sintesi dello stato dell'arte della valutazione della vulnerabilità sismica, con particolare riferimento alle metodologie maggiormente adottate in Italia.

La vulnerabilità sismica consiste nella valutazione della propensione di persone, beni o attività a subire danni al verificarsi dell'evento sismico. Essa misura da una parte la perdita o la riduzione di efficienza, dall'altra la capacità residua a svolgere e assicurare le funzioni che, nel complesso, il sistema territoriale normalmente esplica a regime. Nell'ottica di un'analisi completa della vulnerabilità si pone il problema di individuare non solo i singoli elementi che possono collassare sotto l'impatto del sisma, ma di individuare e quantificare gli effetti che il loro collasso determina sul funzionamento del sistema territoriale.

Le componenti che concorrono alla definizione del concetto di vulnerabilità possono essere distinte in:

- *Vulnerabilità diretta*: definita in rapporto alla propensione del singolo elemento fisico semplice o complesso a subire collasso (ad esempio la vulnerabilità di un edificio, di un viadotto, o di un insediamento).
- *Vulnerabilità indotta*: definita in rapporto agli effetti di crisi dell'organizzazione del territorio generati dal collasso di uno degli elementi fisici (ad esempio la crisi del sistema di trasporto indotta dall'ostruzione di una strada).
- *Vulnerabilità differita*: definita in rapporto agli effetti che si manifestano nelle fasi successive all'evento e alla prima emergenza e tali da modificare il comportamento delle popolazioni insediate (ad esempio il disagio della popolazione conseguente alla riduzione della base occupazionale per il collasso di stabilimenti industriali).

In questa sede, si fa riferimento alla vulnerabilità del patrimonio edilizio e, dunque, alla vulnerabilità diretta. La vulnerabilità sismica di un edificio è definita come quel descrittore sintetico delle caratteristiche strutturali che consente di spiegare un certo grado di danno per un dato livello di azione e può essere quindi considerata come una misura della maggiore o minore propensione dell'edificio stesso a subire danni per effetto di un terremoto di assegnate caratteristiche.

In particolare, la vulnerabilità sismica definisce il comportamento di una costruzione attraverso una legge causa-effetto, in cui la causa è il terremoto e l'effetto è il danno. Considerando l'iterazione tra l'azione sismica e il comportamento degli edifici (indipendentemente da fattori legati all'esposizione) il danno fisico D può essere definito come una funzione formale dell'azione sismica A e della vulnerabilità V :

$$D = A \times V \quad (4.1)$$

La possibilità di quantificare la vulnerabilità passa attraverso l'individuazione di due parametri: l'azione sismica e il danno.

Per il parametro dell'azione sismica, una scelta immediata è quella dell'intensità macrosismica, con il vantaggio fondamentale di avere a disposizione molti dati forniti dalla sismicità storica, relativamente ad un grande numero di tipologie edilizie, ma con lo svantaggio di non poter utilizzare l'intensità macrosismica come dato di ingresso per la stima del danno usando l'analisi strutturale. Un'altra possibile scelta è ricercare un

parametro direttamente connesso al movimento del suolo in un determinato luogo, utilizzando, ad esempio, l'accelerazione di picco al suolo. In questo caso, si avrebbe un minore supporto di dati rispetto all'intensità sismica, perché il numero di terremoti recenti, per cui sono disponibili registrazioni strumentali unitamente ad una stima dei danni provocati, è molto limitato. D'altra parte, però, questo parametro ha un chiaro significato meccanico per comprendere il comportamento degli edifici sottoposti all'azione sismica.

La scelta del parametro del danno presenta maggiori problemi. Alcune proposte includono stime economiche dei costi di ricostruzione rispetto ai costi di edificazione di un nuovo edificio simile, altre valori discreti corrispondenti ad arbitrari stati di danneggiamento, come illustrato in Tabella 4.1, in un approccio simile alle scale di intensità macrosismica.

Tabella 4. 1. Scala di danno sismico (EMS, 1998).

Livello di danno	Descrizione
D0	<i>Assenza di danno</i>
D1	<i>Danno leggero:</i> sottili fessure e cadute di piccole parti di intonaco
D2	<i>Danno moderato:</i> piccole fessure nelle pareti, caduta di porzioni consistenti di intonaco, fessure nei camini parte dei quali cadono
D3	<i>Danno severo:</i> formazione di ampie fessure nei muri, caduta dei camini, distacchi fra le pareti, possibile collasso di porzioni di edifici
D4	<i>Collasso parziale:</i> parti di edificio separate si sconnettono, collasso di pareti interne
D5	<i>Collasso totale:</i> collasso totale dell'edificio

La classificazione dei metodi di stima prevede tre approcci: meccanici, tipologici e semeiotici.

Nel caso dei *metodi meccanici*, le previsioni del danno sono formulate in base a calcoli analitici della risposta sismica dell'edificio e dello stato tensionale e deformativo che le corrisponde. La misura dell'azione sismica è espressa dall'accelerazione massima al suolo o da analoghe grandezze utilizzabili come input per tecniche numeriche, mentre la misura del danno è quantificata da variabili meccaniche. L'attendibilità di questi metodi è quella ordinaria delle analisi strutturali applicate alle costruzioni esistenti, recenti ed antiche.

Nel caso dei *metodi tipologici*, la previsione di danno si fonda sull'identificazione nell'edificio di un numero più o meno grande di indicatori di vulnerabilità, consistenti in elementi tipologici, morfologici, dimensionali, materiali. La misura dell'azione sismica è di tipo macrosismico mentre quella del danno o è macrosismica oppure è basata sui costi. I metodi tipologici si basano sulla definizione di classi di edifici caratterizzate da indicatori tipologici o funzionali ad esempio murature in pietra o solai in legno. Ad ogni classe è associabile una curva di vulnerabilità o una matrice di probabilità di danno; la verifica delle ipotesi formulate in sede di costruzione delle curve di vulnerabilità o delle matrici di danno è affidata all'elaborazione statistica dei danni causati dai terremoti passati agli edifici (analisi a posteriori). In questo modo assegnando un edificio ad una certa classe gli si assegna automaticamente la curva di vulnerabilità, o la matrice di probabilità di danno, che competono alla classe.

I *metodi semeiotici* si basano sulla possibilità di attribuire ad ogni edificio un indice di vulnerabilità e cioè un numero I_V che viene determinato secondo certe regole sulla base di indicatori non più interpretati con significato tipologico, ma come sintomi di una idoneità a sopportare i terremoti (ad esempio l'efficienza dei collegamenti, la resistenza dei materiali, la regolarità morfologica); in un secondo tempo si associa ad ogni valore dell'indice di vulnerabilità una curva di vulnerabilità o una matrice di probabilità di danno. Normalmente l'indice di vulnerabilità è calcolato in funzione di indici parziali corrispondenti a ciascun indicatore ed attribuibili a seguito di esami qualitativi dell'edificio.

Eseguita l'analisi di vulnerabilità e nota la pericolosità sismica dell'area in esame, ovvero le caratteristiche del moto sismico atteso nella regione, eventualmente differenziate per considerare gli effetti di amplificazione locale (microzonazione), è possibile stimare la distribuzione dei danni al costruito. Qualora lo studio di pericolosità sia condotto in termini probabilistici, anche le conseguenze strutturali ed economiche saranno espresse probabilisticamente: tale approccio configura quella che viene denominata un'*analisi di rischio*. Invece, nel caso in cui la sismicità sia studiata su base deterministica, o estraendo da un catalogo di sismicità storica uno o più terremoti significativi o simulando con modelli teorico-numerici i meccanismi di sorgente e la propagazione delle onde nella crosta terrestre, si esegue un'*analisi di*

scenario, ovvero si valutano gli effetti sul territorio a seguito di uno specifico evento sismico.

La scelta tra analisi di rischio e analisi di scenario dipende dalle finalità dello studio. Nel caso di uno studio del territorio a fini preventivi, l'analisi di rischio è preferibile in quanto cumula gli effetti di tutte le potenziali sorgenti sismiche dell'area e fornisce una valutazione comparabile tra i diversi comuni interessati dallo studio. Per analizzare invece gli aspetti di gestione dell'emergenza legati alla Protezione Civile è più significativa un'analisi di scenario, in quanto riproduce una distribuzione realistica degli effetti sul territorio, fatto che consente di elaborare strategie per il post-terremoto; il rischio in alcune aree dello studio è tuttavia sottostimato, in quanto ci si riferisce ad un unico ben preciso evento. In entrambi i casi, tuttavia, si possono utilizzare gli stessi modelli per l'analisi di vulnerabilità.

4.1.2 Metodologie GNDT di I e II livello

Le stime relative al costruito ordinario a scala territoriale comportano valutazioni su campioni di grande numero, dunque, l'uso di modelli di calcolo strutturale è improponibile sia per la difficoltà di individuare modelli semplici ma affidabili, sia per la quantità di dati che sarebbe necessario rilevare sul campo. Le metodologie disponibili devono quindi basarsi su pochi parametri empirici e la loro validazione non può prescindere dall'osservazione dei danni prodotti da terremoti reali.

In Italia sono tradizionalmente utilizzate due distinte metodologie, denominate di I e II livello, sviluppate nell'ambito delle attività del GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti) negli ultimi venti anni.

La *metodologia di I livello GNDT*, attraverso la compilazione di un'apposita scheda (Figure 4.1 e 4.2), individua all'interno del costruito ordinario diverse tipologie edilizie e definisce alcune classi di vulnerabilità (A, B e C), per ciascuna delle quali viene precisata la relazione tra input sismico e danno, attraverso matrici di probabilità di danno DPM (Damage Probability Matrix). Viene quindi stabilita una corrispondenza diretta tra tipologia edilizia e classe di vulnerabilità. Si tratta di un *metodo tipologico*, che in Italia possiede una robusta validazione sperimentale; la distribuzione probabilistica dei danni, indicata per ciascuna classe di vulnerabilità per i diversi livelli dell'intensità sismica, è stata ottenuta sulla base dei danni

effettivamente rilevati a seguito dei principali eventi sismici che hanno interessato il territorio nazionale, ed in particolare del terremoto dell'Irpinia (novembre 1980), il più significativo per quantità dei dati e livelli di intensità sismica (Braga et al. 1982).

La *metodologia di II livello GNDT* è basata su una scheda (Benedetti e Petrini 1984, Figure 4.3 e 4.4) che raccoglie informazioni tipologiche e costruttive su ogni singolo edificio; queste vengono combinate attraverso punteggi indipendenti per definire un indice di vulnerabilità I_V , che caratterizza la propensione dell'edificio al danneggiamento (*metodologia semeiotica*). Ad ogni valore di I_V è associata una curva, che correla il fattore di danno (rapporto tra il costo dell'intervento di riparazione ed il valore dell'opera) al picco di accelerazione dell'input sismico atteso.

In questi ultimi anni si è cercata una revisione critica di queste metodologie, sia per verificare l'applicabilità delle DPM ricavate dai dati irpini alle altre regioni italiane, sia per confrontare i due metodi, che appaiono a prima vista incomparabili nell'approccio, nella definizione dell'input sismico e nella descrizione del danno.

Infatti, il primo non fornisce una valutazione sul singolo fabbricato, ma semplicemente lo enumera all'interno di un insieme di edifici della stessa classe di vulnerabilità, rappresentativa di tipologie diverse e variegata. Il terremoto è considerato in termini di intensità macrosismica ed il danno è descritto attraverso livelli qualitativi, associati all'evidenza di particolari stati lesionativi o di collasso parziale o totale.

Il secondo giunge ad una valutazione specifica, attraverso un indice numerico calcolato a partire da undici indicatori indipendenti, a ciascuno dei quali è attribuito un peso nel computo totale e differenti punteggi a seconda delle caratteristiche (secondo quattro classi di vulnerabilità); il danno è previsto in termini economici, attraverso una famiglia di relazioni trilineari in funzione della PGA (peak ground acceleration). In realtà tali differenze non sono così sostanziali. La valutazione di II livello, anche se eseguita su ogni singolo manufatto, rappresenta un valore medio della risposta di edifici di quelle caratteristiche. Inoltre, la scelta della PGA come parametro sismico è legata alla volontà di utilizzare un parametro continuo (diversamente dall'intensità) e di più chiaro significato meccanico, ma tali curve derivano da

dati di osservazioni sperimentali in intensità, tradotti attraverso una ben precisa legge di correlazione.

Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici pag. 1/3

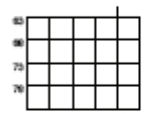
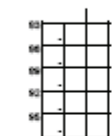
Sezione 1 – DATI RELATIVI ALLA SCHEDA Codice ISTAT Provincia ¹ <input type="text"/> Codice ISTAT Comune ³ <input type="text"/> Comune <input type="text"/>		Scheda n° ⁶ <input type="text"/> Data ¹¹ <input type="text"/> Squadra ¹⁷ <input type="text"/> Prescheda N° <input type="text"/>																																																																
Sezione 2 – LOCALIZZAZIONE EDIFICIO Codice ISTAT sezione Censuaria ¹⁸ <input type="text"/> RIFERIMENTO CATASTALE Foglio ²³ <input type="text"/> Mappale ²⁵ <input type="text"/> Particella ²⁶ <input type="text"/> CARTOGRAFIA DI RILEVAZIONE Foglio ³³ <input type="text"/> Aggregato strutturale ³⁴ <input type="text"/> Edificio ³⁸ <input type="text"/> URBANISTICA Zona di piano ⁴³ <input type="text"/> Piano attuativo ⁴¹ <input type="text"/> Vincoli ⁴² <input type="text"/>		Aggregato strutturale <input type="text"/> Edificio <input type="text"/> 0 via, viale 1 corso 2 vicolo 3 piazza, largo ⁴⁹ <input type="text"/> 4 località Nome ⁴⁴ <input type="text"/> N° civico ⁴⁸ <input type="text"/> N° accessi ⁶⁰ <input type="text"/> N° fronti a comune ⁶² <input type="text"/>																																																																
Sezione 3 – DATI METRICI <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Superficie media coperta (mq)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>N° piani e superficie media coperta uguale</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Altezza media interpiano (m)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>N° piani ad altezza media interpiano uguale</p> </div> </div>		Altezza massima fuori terra valutata alla gronda (m) ⁹⁰ <input type="text"/> Altezza minima fuori terra valutata alla gronda (m) ¹⁰¹ <input type="text"/> Larghezza stradale fronte principale (m) ¹⁰⁴ <input type="text"/>																																																																
Sezione 4 – USO Totale unità d'uso ¹⁰⁰ <input type="text"/> Stato dell'edificio ¹⁰⁰ <input type="text"/> F: finito N: non finito C: in costruzione Totale unità d'uso ¹⁰⁰ <input type="text"/> 1: totalmente utilizzato 2: parzialmente utilizzato 3: non utilizzato 4: abbandonato		Proprietà ¹¹⁰ <input type="text"/> Conduzione prevalente ¹¹¹ <input type="text"/> 1: diretta 2: in locazione																																																																
Residenza 1 sì ¹¹² <input type="text"/> 2 no Abitazioni occupate ¹¹³ <input type="text"/> N° ¹¹⁵ <input type="text"/> Sup.% <input type="text"/> Abitazioni libere ¹¹⁶ <input type="text"/> N° ¹¹⁸ <input type="text"/> Sup.% <input type="text"/> Abitazioni occup. salt. ¹¹⁹ <input type="text"/> N° ¹²¹ <input type="text"/> Sup.% <input type="text"/>		Att. produttive ¹²² <input type="text"/> 1 sì ¹²³ <input type="text"/> 2 no Servizi pubblici ¹²⁴ <input type="text"/> Denomin. edificio ¹²⁶ <input type="text"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Unità d'uso</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>Codice</th> <th>Tipo</th> <th>Sup.%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>130</td><td>140</td><td>143</td><td>144</td></tr> <tr><td>150</td><td>162</td><td>166</td><td>168</td></tr> <tr><td>162</td><td>184</td><td>187</td><td>188</td></tr> <tr><td>204</td><td>206</td><td>208</td><td>216</td></tr> <tr><td>228</td><td>229</td><td>231</td><td>232</td></tr> <tr><td>248</td><td>250</td><td>253</td><td>254</td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Periodo di utilizzazione</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>Mesi</th> <th>giorni</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>145</td><td>146</td></tr> <tr><td>157</td><td>158</td></tr> <tr><td>169</td><td>170</td></tr> <tr><td>211</td><td>212</td></tr> <tr><td>233</td><td>234</td></tr> <tr><td>256</td><td>257</td></tr> </tbody> </table> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Intensità d'uso</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>Utilizzazione media</th> <th>Potenziale max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>150</td><td>151</td></tr> <tr><td>172</td><td>173</td></tr> <tr><td>194</td><td>195</td></tr> <tr><td>216</td><td>217</td></tr> <tr><td>238</td><td>239</td></tr> <tr><td>260</td><td>261</td></tr> </tbody> </table> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Bacino Di utenza</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>h_{agg}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>157</td></tr> <tr><td>179</td></tr> <tr><td>201</td></tr> <tr><td>223</td></tr> <tr><td>245</td></tr> <tr><td>267</td></tr> </tbody> </table> </div> </div>		N°	Codice	Tipo	Sup.%	130	140	143	144	150	162	166	168	162	184	187	188	204	206	208	216	228	229	231	232	248	250	253	254	Mesi	giorni	145	146	157	158	169	170	211	212	233	234	256	257	Utilizzazione media	Potenziale max	150	151	172	173	194	195	216	217	238	239	260	261	h _{agg}	157	179	201	223	245	267
N°	Codice	Tipo	Sup.%																																																															
130	140	143	144																																																															
150	162	166	168																																																															
162	184	187	188																																																															
204	206	208	216																																																															
228	229	231	232																																																															
248	250	253	254																																																															
Mesi	giorni																																																																	
145	146																																																																	
157	158																																																																	
169	170																																																																	
211	212																																																																	
233	234																																																																	
256	257																																																																	
Utilizzazione media	Potenziale max																																																																	
150	151																																																																	
172	173																																																																	
194	195																																																																	
216	217																																																																	
238	239																																																																	
260	261																																																																	
h _{agg}																																																																		
157																																																																		
179																																																																		
201																																																																		
223																																																																		
245																																																																		
267																																																																		

Figura 4. 1. Scheda I livello GNDT, prospetto anteriore.

Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici

Sezione 5 – ETÀ DELLA COSTRUZIONE – INTERVENTI

Classi di età

A	prima dell' '19
B	'19 - '45
C	'46 - '60
D	'61 - '71
E	'72 - '81
F	dopo l' '81
G
H

INTERVENTI

Intervento	Intervento	Intervento	Intervento
A	B	C	D
E	F	G	H
I	L	M	N
O	P	Q	R

Classe di età di costr. ²⁷⁰ []

Classe di età ultimo intervento significat. ²⁷¹ []

Tipo ultimo int. signif. ²⁷² []

R = in deroga (Art.30 L. 64/74)

Sezione 6 – STATO DELLE FINITURE E IMPIANTI

E Efficiente Intonaci e paramenti esterni ²⁷³ []

N Non efficiente Infissi esterni ²⁷⁴ []

Z Non esistenti Impianto elettrico ²⁷⁵ []

Impianto idrico ²⁷⁶ []

Finiture interne (intonaci, pavim., ..) ²⁷⁷ []

Riscaldamento ²⁷⁸ []

Servizi igienici ²⁷⁹ []

Sezione 7 – TIPOLOGIA STRUTTURALE

Strutture verticali

A Munture a secco

B Munture a secco con ricorsi, spigoli, mazzette

C Munture pietra sbazzata

D Munture pietra sbazzata con ricorsi, spigoli, mazzette

E Munture pietra intondata

F Munture pietra intondata con ricorsi, spigoli, mazzette

G Munture blocchetti tufo, pietra ben squadrate

H Munture blocchetti calcestruzzo inerti pesanti

I Munture blocchetti calcestruzzo inerti leggeri

L Munture mattoni pieni o multifori

M Munture mattoni forati

N Pareti calcestruzzo non armato

O Pareti calcestruzzo armato

P Telai di c.a. non tamponati

Q Telai di c.a. con tamponature deboli

R Telai di c.a. con tamponature consistenti

S Ossature metallica

T Miste

U

V

Strutture orizzontali

A Legno

B Legno con catene

C Puntelle e voline o travettoni

D Puntelle e voline o travettoni con catene

E Laterocemento o solette in c.a.

F Volte senza catene

G Volte con catene

H Miste volte solai

I Miste volte solai con catene

Scale

0 Struttura appoggiata in legno

1 Struttura a sbalzo in legno

2 Struttura appoggiata in acciaio

3 Struttura a sbalzo in acciaio

4 Struttura appoggiata in pietra o laterizio

5 Struttura a sbalzo in pietra o laterizio

6 Volta appoggiata in muratura

7 Volta a sbalzo in muratura

8 Struttura appoggiata in c.a.

9 Struttura a sbalzo in c.a.

Coperture

M Legno spingente

N Legno "poco spingente" (vedi manuale)

O Legno a spinta eliminata o solette orizzontali

P Laterocemento o solette in c.a.

Q Acciaio spingente

R Acciaio non spingente

S Mista spingente

T Mista non spingente

U

Tipologia strutturale prevalente ²⁸⁰ []

1 Tipologia specialistica (capannoni, chiese, ...)

2 Muratura o mista

3 Calcestruzzo armato

4 Acciaio

5 altro

Tipologia strutturale

Tipologia strutturale	N° piani a tipologia strutturale uguale
281	
282	
283	
284	
285	
286	
287	

Verde
Giallo
Rosso e cop.

Sezione 8 – ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO

Evento in data ²⁸⁸ []

1 sisma ²⁸⁹ []

2 altro

M = livello danno max rilevato

E = estensione danno più diffuso

L = livello danno più diffuso

Livello del danno

A	Nessun danno	0	≤ 10%
B	Danno lieve	1	10% < ≤ 20%
C	Danno medio	2	20% < ≤ 30%
D	Danno grave	3	30% < ≤ 40%
E	Danno gravissimo	4	40% < ≤ 50%
F	Danno totale	5	50% < ≤ 60%
		6	60% < ≤ 70%
		7	70% < ≤ 80%
		8	80% < ≤ 90%
		9	90% <

Danni a impianti 1 sì ²⁹⁰ [] 2 no

Strutture verticali

M	E	L	N°
328			
329			
330			
331			
332			
333			
334			

Strutture orizzontali

M	E	L	N°
335			
336			
337			
338			
339			
340			
341			

Scale

M	E	L	N°
342			
343			
344			

Temperature

M	E	L	N°
345			
346			
347			
348			
349			
350			
351			

Figura 4. 2. Scheda I livello GNDT, prospetto posteriore.

G.N.D.T. – SCHEDA DI VULNERABILITÀ DI 2° LIVELLO (CALCESTRUZZO ARMATO)



Codice ISTAT Provincia 1/ /		Codice ISTAT Comune 4/ /		Scheda N° 2/ /		
PARAMETRI	Classi	ELEMENTI DI VALUTAZIONE E SCHEMI – RICHIAMI				
1	TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE		<p>La valutazione va riferita alla direzione più debole.</p> <p>1 Pareti in c.a. in entrambi le direzione 2 Pilastri e travi alte 3 Pilastri e travi in spessore di solaio 4 Altro _____ 5 Non so</p>			
2	DISTRIBUZIONE DELLE TAMPONATURE		<p>Considerare solo le tamponature esterne e i campi di tamponatura pieni per più del 70% a contatto con la maglia strutturale (travi e pilastri).</p> <p>A Su 4 lati esterni B Su 3 lati esterni C Su 2 lati esterni D Su 1 lato esterno</p>			
3	CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	Forma	<p>Il nucleo scala e ascensore sono da considerarsi resistenti quando sono realizzati o in pareti di c.a. o a struttura intelaiata con tamponatura consistente (Blocchi cis o tufo, mattoni pieni o forati doppio UNI)</p> <p>1 Forma compatta con nucleo scala/ascensore resistente centrale</p> <p>2 Forma compatta con nucleo scala/ascensore resistente eccentrico</p> <p>3 Forma non compatta con nucleo scala/ascensore resistente centrale</p> <p>4 Forma non compatta con nucleo scala/ascensore resistente eccentrico</p>			
4	IRREGOLARITÀ IN ELEVAZIONE	Piano debole Pilastri forati	<p>Per piano debole si intende un piano che ha una rigidità ridotta rispetto agli altri come il caso di piano pilotis o piani con grandi aperture o piani privi di tamponature o tamponature poste in aggetto o arretrate rispetto alla maglia strutturale</p> <p>A Assente B Diverso dal piano terra con nucleo scala/ascensore resistente C Al piano terra con nucleo scala/ascensore resistente D Diverso dal piano terra senza nucleo scala/ascensore resistente E Al piano terra senza nucleo scala/ascensore resistente</p> <p>1 Assenti 2 Per travi a ginocchio o piani sfalsati 3 Per finestre a nastro 4 Altro _____</p>			

Figura 4. 3. Scheda II livello GNDT, cemento armato.

Codice ISTAT Provincia 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0			Codice ISTAT Comune 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0			Scheda N° 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0		
PARAMETRI			ELEMENTI DI VALUTAZIONE			SCHEMI - RICHIAMI		
1	TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.)	11 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	22 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Norme nuove costruzioni (Clas. A) 21 <input type="text"/>				
				Norme riparazioni (Clas. A) 2 <input type="text"/>				
				Cordoli e catene tutti i livelli (Clas. B) 3 <input type="text"/>				
				Buoni ammassori, fra muri (Clas. C) 4 <input type="text"/>				
				Senza cordoli catene ammass. (Clas. D) 5 <input type="text"/>				
2	QUALITÀ DEL S.R.	12 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	23 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	(vedi manuale) 24 <input type="text"/>				
3	RESISTENZA CONVENZIONALE	13 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	24 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Numero di piani N 25 <input type="text"/>				
				Area totale coperta A _t (mq) 27 <input type="text"/>				
				Area A _u (mq) 43 <input type="text"/>				
				Area A _y (mq) 44 <input type="text"/>				
				q _u (litro) 47 <input type="text"/>				
Alt. media interpiano h (m) 48 <input type="text"/>								
Peso specifico pareti p _{pe} (t/mc) 52 <input type="text"/>								
Carico permanente soletti p _u (litro) 53 <input type="text"/>								
4	POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONE	14 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	25 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Pendenza percentuale del terreno 55 <input type="text"/>				
				Rocce Fondazioni: Si 5 <input type="text"/> No 6 <input type="text"/>				
				Terr. sciolto non sping. Fond.: Si 3 <input type="text"/> No 4 <input type="text"/>				
				Terr. sciolto spingente Fond.: Si 5 <input type="text"/> No 6 <input type="text"/>				
				Differen. max. di quote Δh (m) 56 <input type="text"/>				
5	ORIZZONTAMENTI	15 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	26 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Piani sfalsati Si 1 <input type="text"/> No 2 <input type="text"/>				
				Orizzontamenti rigidi e ben collegati 63 <input type="text"/>				
				Orizzontam. deformabili e ben collegati 2 <input type="text"/>				
				Orizzontam. rigidi e mal collegati 3 <input type="text"/>				
				Orizzontam. deformabili e mal collegati 4 <input type="text"/>				
% Orizzontam. rigidi e ben collegati 64 <input type="text"/>								
6	CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	16 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	27 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Rapporto percentuale f _u = at 65 <input type="text"/>				
				Rapporto percentuale f _u = bt 66 <input type="text"/>				
				% aumento (+) o diminuzione (-) di massa 70 <input type="text"/>				
				Rapporto percentuale T/H 71 <input type="text"/>				
				Perimetrale superficie portante 73a <input type="text"/>				
Piano terra porticato Si 1 <input type="text"/> No 2 <input type="text"/>								
7	CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE	17 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	28 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Rapporto massimo l/a 72 <input type="text"/>				
				Copert. non sp. 74 <input type="text"/> poco sp. 8 <input type="text"/> sp. 2 <input type="text"/>				
				Cordoli in copertura Si 15 <input type="text"/> No 1 <input type="text"/>				
				Catene in copertura Si 1 <input type="text"/> No 2 <input type="text"/>				
				Carico perm. coper. p _u (litro) 82 <input type="text"/>				
Lungh. appoggio coper. la (m) 83 <input type="text"/>								
Perimetro copertura l (m) 83b <input type="text"/>								
8	D _{max} MURATURE	18 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	29 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	(vedi manuale)				
				(vedi manuale)				
				(vedi manuale)				
				(vedi manuale)				
				(vedi manuale)				
9	COPERTURA	19 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	30 <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Copert. non spig. (Spoglia M)				
				Copert. poco spig. (Spoglia N)				
				Copert. non spig. (Spoglia O)				
				Copert. non spig. (Spoglia P)				
				Copert. non spig. (Spoglia Q)				

Figura 4. 4. Scheda II livello GNDT, murature.

4.1.2 Scheda MEDEA

La valutazione del danno causato da un evento sismico sugli edifici costituisce una problematica di centrale interesse. L'attenzione è in particolare rivolta all'individuazione di criteri e metodi che consentano un'oggettività di valutazione, in base alla quale formulare le più idonee correlazioni tra il parametro di misura del cimento sismico ed il danno. Allo stato attuale esistono notevoli incertezze ed ambiguità sia nella definizione dei gradi di danno da assumere, sia nell'identificazione dello stesso da parte degli operatori preposti alle campagne di sopralluogo. A questo si aggiunge che, nella fase di emergenza post-sisma, i tecnici sono spesso chiamati a prendere decisioni in merito all'effettiva agibilità degli edifici, pur non essendo ancora stati definiti criteri "oggettivi" in grado di fornire indicazioni sui livelli di sicurezza richiesti caso per caso.

In quest'ottica, Zuccaro e Papa (2002) propongono una metodologia speditiva di analisi del danno sismico attraverso il riconoscimento delle caratteristiche del quadro fessurativo presente correlato ad un'interpretazione in termini di meccanismi di collasso. Questo approccio è stato codificato in uno strumento di raccolta dati sul campo, noto come *scheda MEDEA* (Manuale Di Esercitazioni sul Danno Ed Agibilità).

Il fulcro di MEDEA è costituito da un catalogo dettagliato dei principali danni ad elementi strutturali e non strutturali. La classificazione dei danni alle strutture degli edifici ordinari è accompagnata da una loro interpretazione in chiave di possibili meccanismi di collasso. Pertanto il catalogo è organizzato sulla base di regole logiche che indirizzano l'identificazione del meccanismo più probabile.

La scheda presenta due abachi relativi ai meccanismi di collasso e ai danni, distinti per strutture in muratura e in c.a.

L'*Abaco dei meccanismi di collasso* riporta i principali meccanismi di collasso riconoscibili per una costruzione ordinaria in muratura (Figura 4.5) o in c.a. (Figura 4.6). Sulla base di questa classificazione generale sono stati riconosciuti differenti meccanismi di collasso correlati a danni sismici e descritti attraverso schemi di riferimento, note e foto. I meccanismi di collasso sono stati distinti in:

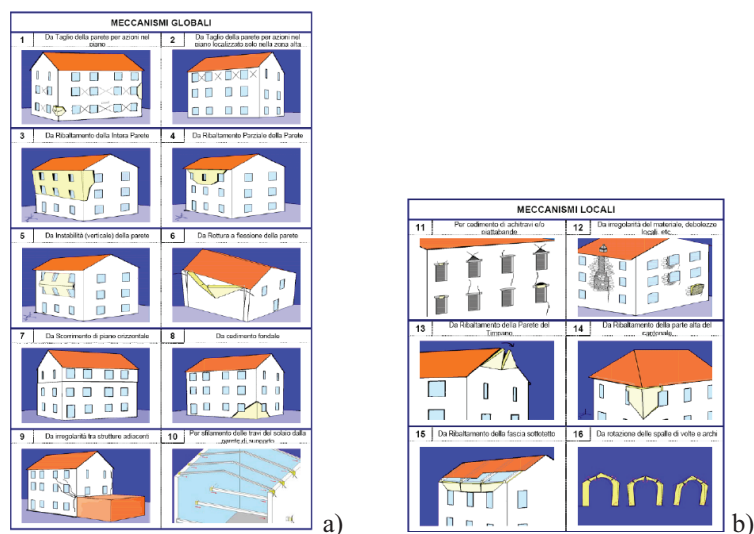


Figura 4. 5. MEDEA. Abaco dei meccanismi di collasso per edifici ordinari in muratura: a) meccanismi globali; b) meccanismi locali.

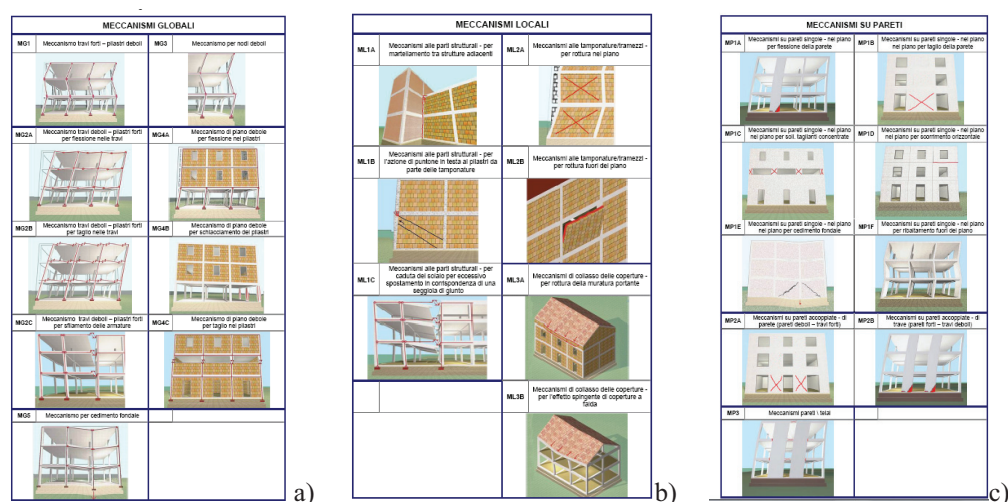


Figura 4. 6. MEDEA. Abaco dei meccanismi di collasso per edifici ordinari in cemento armato. a) meccanismi globali; b) meccanismi locali; c) meccanismi su pareti.

- Meccanismi globali, intendendosi con quest'accezione quei meccanismi che interessano la struttura nel suo complesso e, quindi

relativi all'evolversi di quadri fessurativi in un numero di elementi sufficiente a determinare la totale compromissione dell'equilibrio statico e dinamico del sistema strutturale; tali meccanismi sono stati distinti in meccanismi nel piano, meccanismi fuori del piano, altri meccanismi.

- Meccanismi locali, intendendosi con quest'accezione quei meccanismi che interessano parti marginali della struttura ed il cui evolversi, pur pregiudicando il singolo elemento, in genere non compromette l'intero equilibrio strutturale. Tali meccanismi sono stati distinti in meccanismi per dislocazioni locali e meccanismi per elementi spingenti.
- Meccanismi su pareti per il solo caso di edifici in c.a. con pareti portanti.

L'*Abaco dei danni* fornisce una classificazione dei principali danni riscontrabili a vista (danno osservato o apparente) per singoli elementi: strutture verticali, strutture orizzontali, scale, elementi non strutturali (Figure 4.7 e 4.8).

La scheda MEDEA oltre ai meccanismi di collasso e ai danni rileva la presenza dei seguenti elementi di vulnerabilità:

Edifici ordinari in muratura:

- mancanza di ammassamento tra pareti ortogonali e/o catene o cordoli ai vari livelli;
- presenza di cordoli in breccia su murature a doppio paramento;
- orizzontamenti di qualsiasi tipo mal collegati alle pareti;
- muratura di scadente qualità, area resistente ridotta in una o entrambe le direzioni;
- alta percentuale di forature;
- fondazione inadeguata a sostenere l'incremento di carico verticale dovuto al sisma;
- differenza di consistenza nei terreni di fondazione, presenza di fenomeni franosi o liquefazione;
- presenza di corpi aggiunti di differente rigidità e/o con collegamenti localizzati;
- variazioni del sistema resistente ai livelli superiori; presenza di una sopraelevazione e/o di una struttura di copertura rigida mal collegata;



Figura 4.7. MEDEA. Abaco dei Danni per edifici in muratura per:
a-c) strutture verticali; d-e) strutture orizzontali.

- presenza di piani sfalsati;
- eccessiva distanza fra muri di controvento;
- copertura spingente e/o mancanza di connessione della parete di copertura;
- presenza di architravi con ridotta rigidezza flessionale o con inadeguata lunghezza di appoggio;
- presenza di archi ribassati e/o piattabande con imposte inadeguate;
- riduzioni localizzate della sezione muraria (presenza di canne fumarie, cavedi, nicchie, etc.);

- presenza di trave di colmo di notevoli dimensioni;
- presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura.

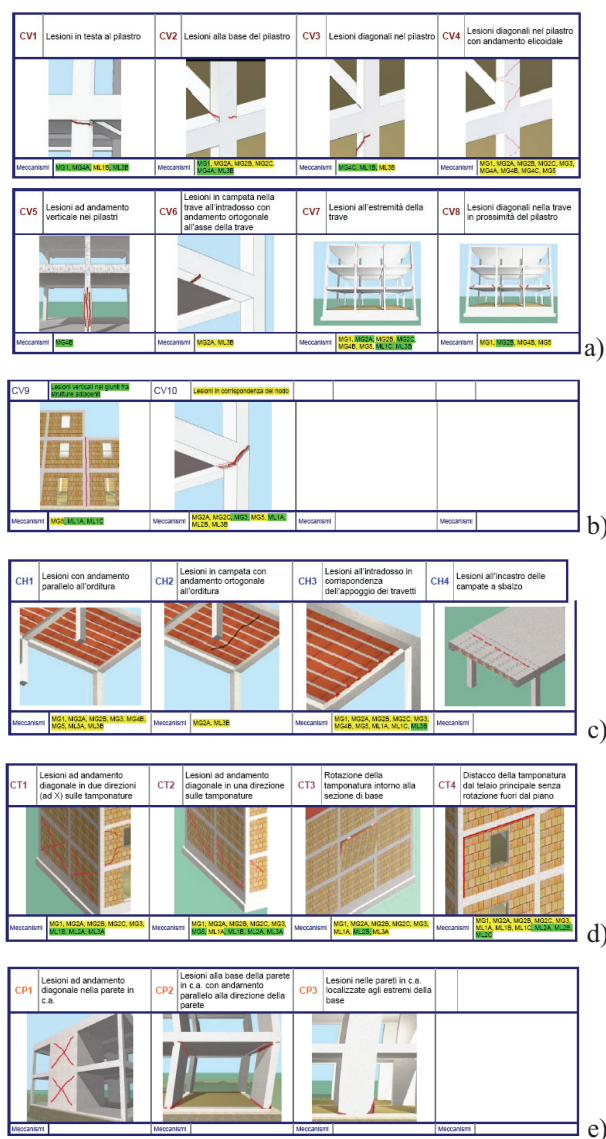


Figura 4.8. MEDEA. Abaco dei Danni per edifici in cemento armato per: a-b) strutture verticali; c) strutture orizzontali; d) tamponature; e) pareti in c.a.

Edifici ordinari in cemento armato:

- prevalenza di pareti o telai tamponati con murature consistenti;
- prevalenza di telai e tamponature poco consistenti;
- prevalenza di telai con travi in spessore di solaio tamponature poco consistenti;
- presenza di telai con travi alte sul perimetro con tamponature poco consistenti e travi a spessore;
- presenza contemp. di telai con travi alte e nuclei in c.a. interni;
- prevalenza di setti;
- edificio isolato;
- giunti a norma;
- giunti fuori norma;
- elementi tozzi assenti;
- travi ginocchio/ piani sfalsati;
- elementi tozzi per finestre a nastro;
- elementi tozzi per altre cause;
- pianta compatta regolare;
- pianta mediamente compatta e regolare;
- pianta poco compatta;
- assenza di bow windows;
- bow windows inferiori a 1,5m;
- bow windows superiori a 1,5m;
- interasse medio tra i pilastri $< 4,5\text{m}$;
- interasse medio tra i pilastri compreso tra 4,5 e 6m;
- interasse medio tra i pilastri $> 6\text{m}$;
- dimensione media pilastri 1° livello $< 25\text{cm}$;
- dimensione media pilastri 1° livello compresa tra 25 e 45cm;
- dimensione media pilastri 1° livello $> 45\text{cm}$;
- tamponature 1° livello su 4 lati esterni;
- tamponature 1° livello su 3 lati esterni;
- tamponature 1° livello su 3 lati esterni;
- tamponature 1° livello su 1 lato esterno;
- tamponature 1° livello assenti;
- pilastri arretrati;
- cortina esterna non inserita nel telaio.

4.1.3 Scheda per il rilievo di beni monumentali

I metodi fino ad ora illustrati e le relative schede di rilevamento, si riferiscono ad edifici ordinari. Allo scopo di estendere le analisi ai beni monumentali, il Dipartimento di Protezione Civile, nell'ambito del Gruppo di Lavoro per la prevenzione dei BENI Culturali dai rischi naturali (G.LA.BE C.), ha definito una Scheda *ad hoc* (DPCM, 2006) che tenesse in conto le peculiarità costruttive ed architettoniche dei “palazzi” monumentali non rilevabili mediante gli strumenti schedografici preesistenti. Con il termine “palazzo” si è indicato un edificio di interesse storico-artistico appartenente al patrimonio culturale nazionale.

Le finalità sono: conoscenza del manufatto; analisi del danno; studio dei vari macroelementi; analisi del danno dei beni artistici contenuti; giudizio di agibilità e provvedimenti di pronto intervento; stima economica dei danni e dei costi di intervento; individuazione opportuna degli interventi.

La scheda PALAZZI si compone di due sezioni. La prima è articolata in 13 campi (B1- B13) ed è finalizzata all'identificazione del bene oggetto del rilievo in termini di localizzazione, contesto e tipologia dei beni artistici presenti (campo B11, Figura 4.9), ecc. La seconda è articolata in 19 campi (B14- B32) ed è orientata in modo specifico all'identificazione della tipologia strutturale e del danno dei diversi componenti strutturali (pareti perimetrali, porticati e logge, pareti interne, corpi scala, orizzontamenti, coperture, balconi, elementi aggettanti, elementi svettanti e corpi annessi) e non strutturali (comignoli, cornicioni, statue o aggetti, rivestimenti o controsoffitti recenti, rete idrica, fognaria o termoidraulica, rete elettrica o del gas). La seconda sezione mira, inoltre, all'interpretazione della risposta strutturale mediante l'individuazione dei meccanismi di collasso ed della sintesi di tali informazioni attraverso la definizione del giudizio di agibilità, delle eventuali opere di provvedimento di primo intervento e della stima sommaria del costo delle opere.

In particolare, i meccanismi di collasso contemplati sono 23 e sono illustrati attraverso degli appositi abachi (Figure 4.10-4.13):

- M1 Ribaltamento delle pareti;
- M2 Instabilità verticale delle pareti;
- M3 Rottura a flessione delle pareti;
- M4 Ribaltamento del cantonale;

- M5 Taglio nelle pareti esterne: maschi;
- M6 Taglio nelle pareti esterne: arcitravi e muratura sovrastante;
- M7 Taglio nelle pareti interne;
- M8 Scorrimento di piano;
- M9 Danno ai porticati/logge;
- M10 Sfilamento testa delle travi e/o martellamento;
- M11 Collassi locali dell'impalcato della volta;
- M12 Danni alle volte per rotazioni delle imposte;
- M13 Danno alle volte per deformazioni di piano;
- M14 Danno alle scale;
- M15 Danno negli elementi di copertura;
- M16 Danno al manto di copertura;
- M17 Ribaltamento delle facce sottotetto e timpano;
- M18 Danno agli elementi aggettanti/svettanti;
- M19 Colassi locali per irregolarità costruttive e del materiale;
- M20 Danno per irregolarità di forma;
- M21 Danno nei corpi annessi;
- M22 Cedimento di fondazioni;
- M23 Altro.

B₁₁ – TIPOLOGIA DEI BENI ARTISTICI PRESENTI

TIPOLOGIA		Num.	superficie	TIPOLOGIA		Num.	superficie
Affreschi	<input type="checkbox"/>	__	__	Dipinti mobili su vario supporto	<input type="checkbox"/>	__	__
Mosaici	<input type="checkbox"/>	__	__	Arredi (soffitti, amboni, pulpito, stalli corali)	<input type="checkbox"/>	__	__
Stucchi	<input type="checkbox"/>	__	__	Decorazioni plastiche mobili	<input type="checkbox"/>	__	__
Arazzi	<input type="checkbox"/>	__	__	Manufatti in carta e pergamena	<input type="checkbox"/>	__	__
Altari / statue	<input type="checkbox"/>	__	__	Reperti archeologici	<input type="checkbox"/>	__	__
Libri / Stampe	<input type="checkbox"/>	__	__	Altri	<input type="checkbox"/>	__	__

Figura 4. 9. Scheda Palazzi. Campo B11: Tipologia dei beni artistici presenti.

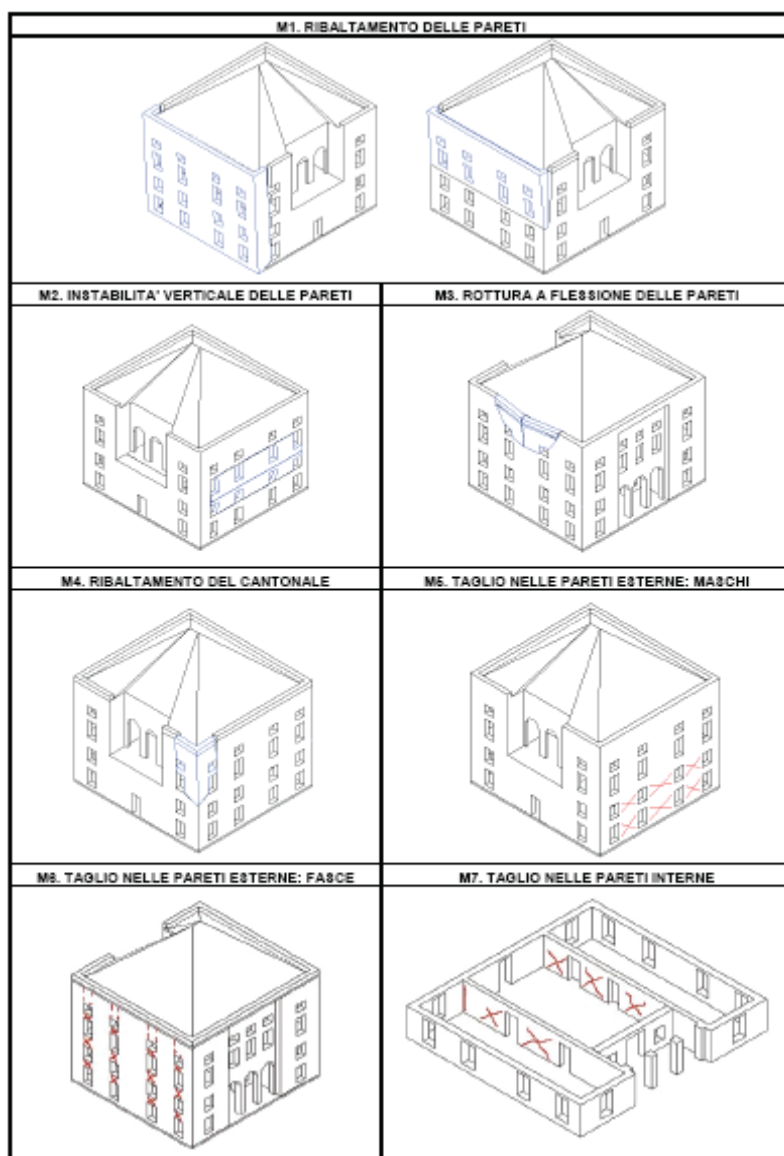


Figura 4. 10. Scheda Palazzi. Abaco dei meccanismi di collasso M1-M7.

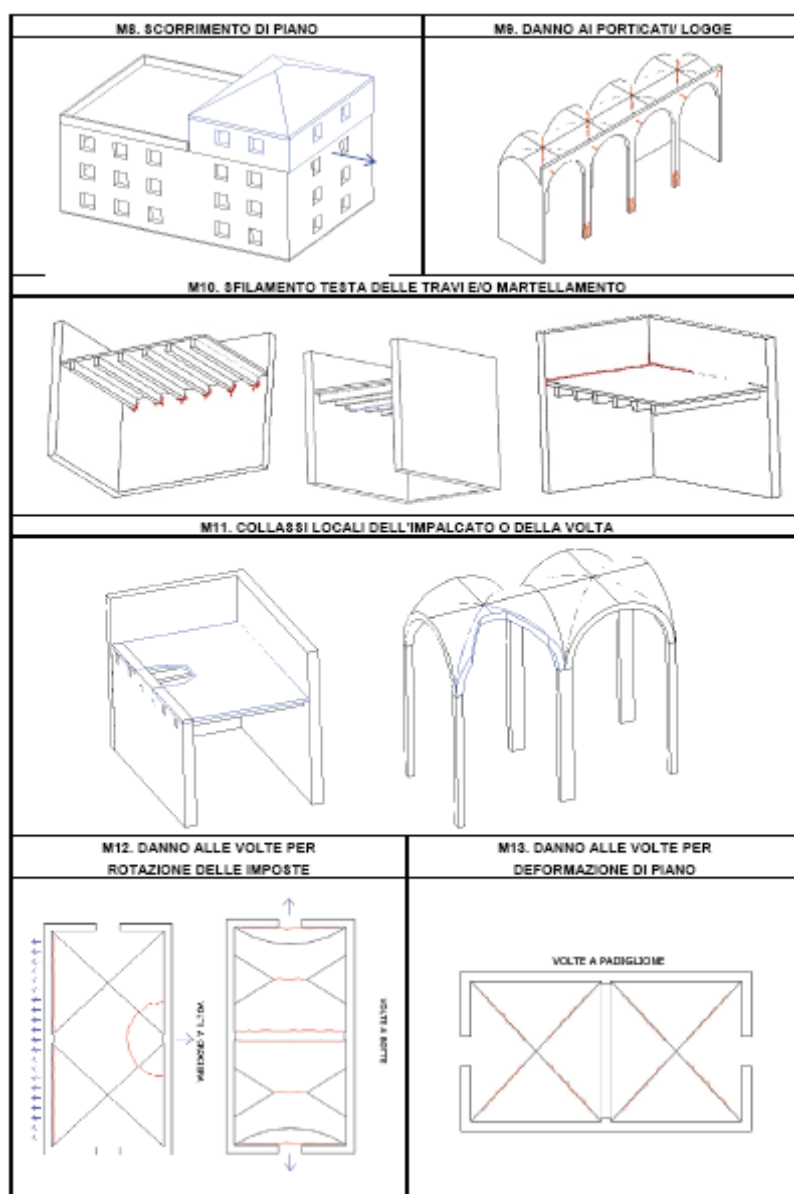


Figura 4. 11. Scheda Palazzi. Abaco dei meccanismi di collasso M8-M13.

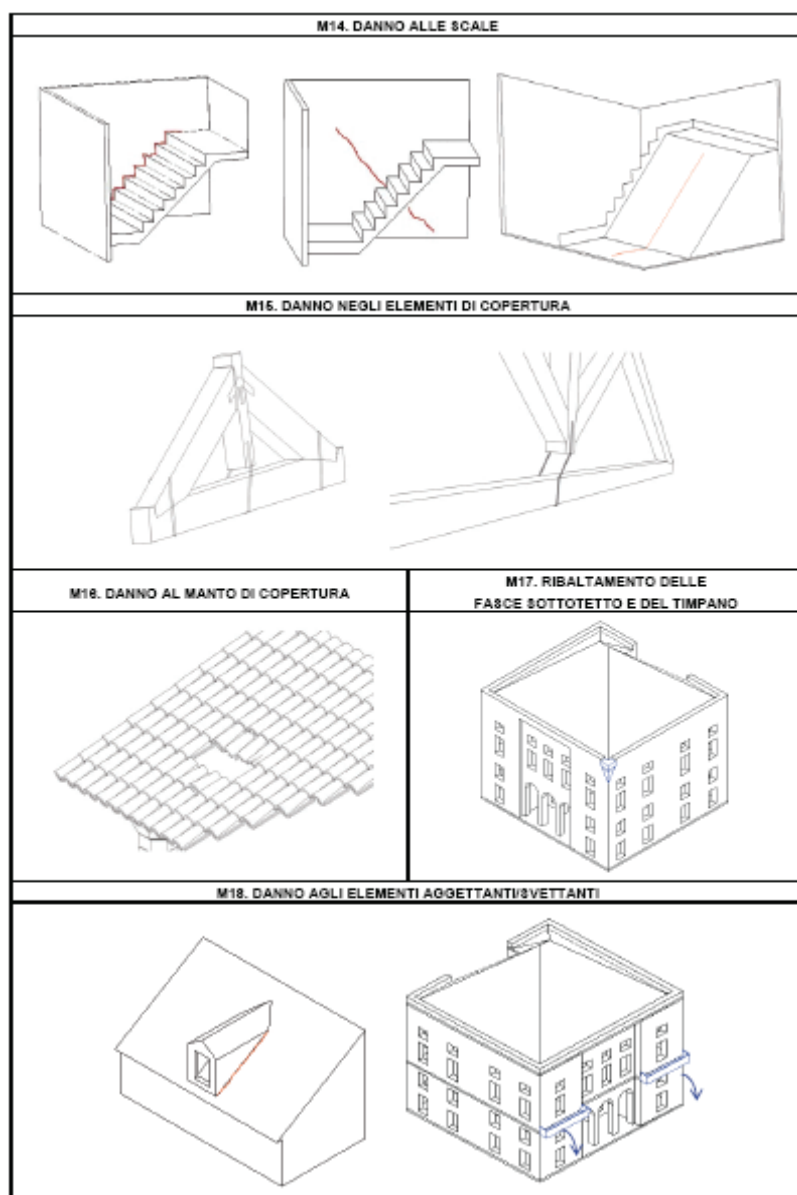


Figura 4. 12 Scheda Palazzi. Abaco dei meccanismi di collasso M14-M18.

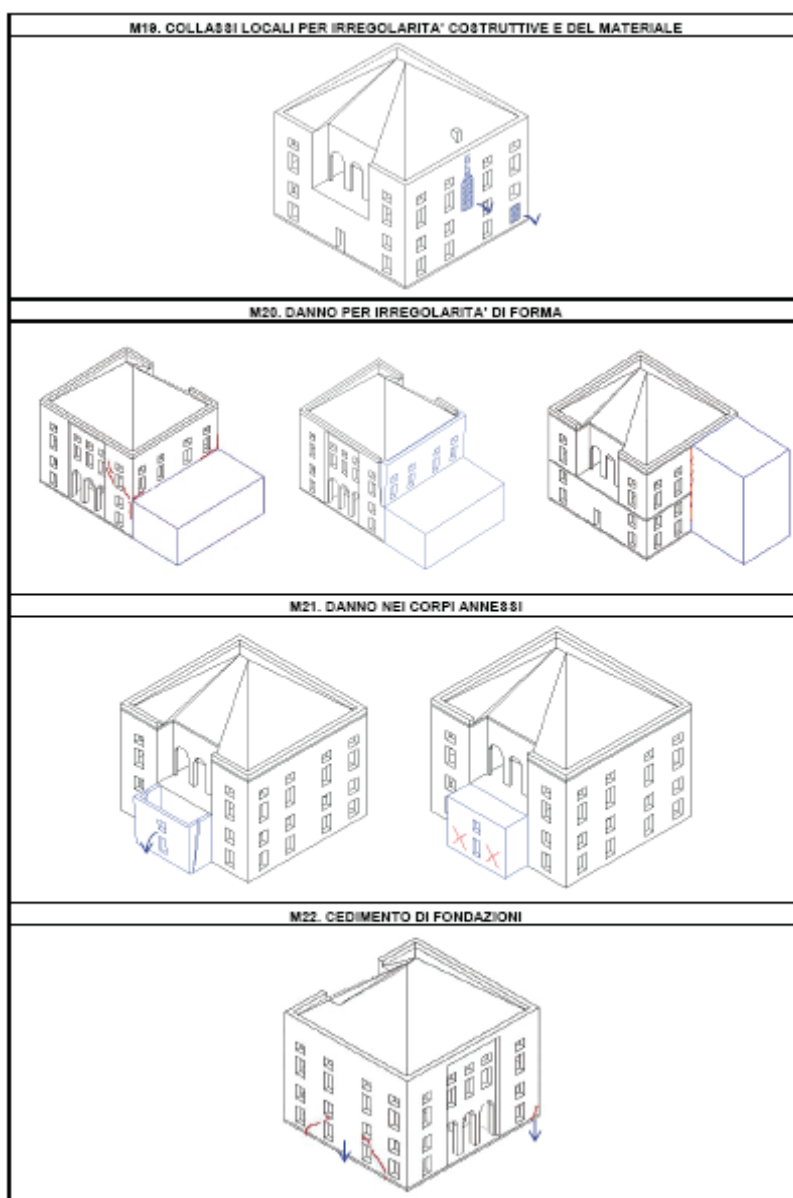


Figura 4. 13 Scheda Palazzi. Abaco dei meccanismi di collasso M19-M22.

4.2. VULNERABILITÀ VULCANICA

Differentemente dalle metodologie per la valutazione della vulnerabilità sismica, quelle relative alla valutazione della vulnerabilità vulcanica non hanno uno stato dell'arte consolidato.

Nel seguito, è illustrato l'approccio adottato nell'ambito del progetto europeo EXPLORIS, *Explosive Eruption Risk and Decision Support for EU Populations Threatened by Volcanoes* (2002-2005), per la valutazione della vulnerabilità vulcanica dell'area vesuviana (Zuccaro et al., 2008).

Questo metodo, in relazione all'evento vulcanico, assume tre sole azioni eccezionali:

- terremoto vulcanico (EQ);
- depositi da caduta (AF).
- flussi piroclastici (PF);

Lo scenario finale dovuto all'intero fenomeno eruttivo può essere esaminato considerando il danno cumulato esibito dalla struttura al verificarsi di una possibile sequenza di eventi. Il progressivo deterioramento della costruzione e delle relative caratteristiche di resistenza è rappresentato attraverso un livello di danno, inquadrato nella scala sismica D0-D5 di Tabella 4.1., anche con riferimento a danni causati dai depositi da caduta e dai flussi piroclastici. A questo scopo, la vulnerabilità degli elementi non strutturali (NSE), quali finestre, porte, pannelli di tamponamento, ecc, sotto l'azione di PF è stata presa in considerazione separatamente, mentre le conseguenze prodotte sulla struttura dalla crisi degli NSE (incendio, tetto esplosioni, incidenti, ecc) sono state considerate in termini di danno sismico equivalente. Per gli AF, gli unici livelli di danno assunti sono D4 e D5 assimilabili, rispettivamente, a collasso parziale e totale del tetto. In entrambi i casi, l'edificio è considerato "perduto". Danni di livello inferiore (D1-D3) sono assunti come non direttamente causati da AF.

Nell'ipotesi che una struttura sia in grado di resistere a numerosi eventi di moderata intensità il cui limite superiore corrisponda ad un danno di livello D3 (EMS, 1998), si può assumere che:

- la struttura può sopravvivere a numerosi eventi che causino danni di livello D2;

- quando un edificio, a causa di uno o più eventi precedenti, raggiunge la classe di danno classe D3, la struttura non è in condizione di sopravvivere un altro evento paragonabile, senza essere almeno in parte crollato.

La metodologia in esame è di tipo *tipologico* ed associa a ciascun edificio ordinario rilevato tre differenti classi tipologiche, in funzione dell'azione considerata (EQ, AF, PF).

Le classi tipologiche relative all'effetto del sisma, indicate in Tabella 4.2, sono individuate attraverso la combinazione delle strutture verticali ed orizzontali.

Tabella 4. 2. EQ. Classificazione tipologica degli edifici vesuviani (Zuccaro et al., 2008).

		STRUTTURA ORIZZONTALE				
		SCARSA RIGIDEZZA Volte e/o solai in legno senza tiranti	TECNOLOG. POVERA "SAP" floor	MEDIA RIGIDEZZA Volte e/o Solai in legno con tiranti	RIGIDEZZ. MEDIO-ALTA Solai con putrelle	ELEVATA RIGIDEZZ. Solai in c.a.
STRUTTURA VERTICALE	MURATURA DEBOLE Muratura in pietra sbazzata trascurata	A _s	A _s	A _s	A _s	A _s
	MURATURA DI MEDIA QUALITA' Muratura in pietra sbazzata mantenuta	A _s	A _s	B _s	B _s	B _s
	MURATURA RESISTENTE Muratura di mattoni squadriati	A _s	A _s	B _s	B _s	C _s
	STRUTTURE INTELAIATE	-	B _s	-	-	D _s

Le classi tipologiche delle coperture, relative all'effetto dei depositi da caduta e indicate in Tabella 4.3, sono individuate la raccolta di dati su 19.000 edifici della Zona Rossa.

Infine, la classificazione strutturale per valutazione della vulnerabilità per effetto dell'azione dei flussi piroclastici (Tabella 4.4) è stata effettuata valutando preliminarmente l'importanza di alcuni elementi costruttivi della struttura e, successivamente, attraverso l'analisi allo stato limite di collasso di semplici modelli in c.a. e in muratura.

Tabella 4. 3. AF. Classificazione tipologica delle coperture (Zuccaro et al., 2008).

Classe	Descrizione
A _r	Copertura in legno debolmente inclinata
B _r	Copertura in legno piana
	Copertura in c.a. piana, tipo SAP
	Copertura piana in acciaio con voltine
C1 _r	Copertura piana in c.a., con più di venti anni di età
C2 _r	Copertura piana in c.a., con meno di venti anni di età
	Copertura piana in c.a. di recente realizzazione
D _r	Copertura inclinata in c.a. di recente realizzazione
	Copertura inclinata in acciaio di recente realizzazione

Tabella 4. 4. PF. Classificazione tipologica degli edifici vesuviani (Zuccaro et al., 2008).

	Classe	Descrizione
Muratura	A _p	Edifici in muratura debole di 3-4 piano con orizzontamenti deformabili
		Edifici in muratura debole o resistente con più di 4 piani
	B _p	Edifici in muratura media di 1-2 piani con orizzontamenti deformabili
		Edifici in muratura resistente con più di 3 piani e orizzontamenti rigidi
	C _p	Edifici in muratura resistente di 1-2 piani e orizzontamenti rigidi
C. A.	D _p	Edificio non antisismico in c.a. con più di 6 piani
	E _p	Edificio non antisismico in c.a. con più di 4-6 piani
	F _p	Edificio non antisismico in c.a. con più di 1-3 piani

Le curve di vulnerabilità relative a ciascuna delle tre azioni considerate (EQ, AF, PF), indicate nelle Figure 4.14- 4.16, sono state individuate attraverso un approccio ibrido probabilistico- stocatico, basato su analisi numeriche, prove sperimentali e calcoli statistici.

Una routine è stata sviluppata per stimare il deterioramento della resistenza durante il verificarsi degli eventi. Nel dettaglio:

- se l'edificio non ha subito danni (D0) o ha subito solo danni leggeri (D1), conserverà la classe di vulnerabilità che aveva prima dell'evento.
- se l'edificio ha subito danni moderati (D2), il livello di vulnerabilità originario sarà aumentato di una classe.
- se l'edificio ha subito gravi danni (D3) il grado di vulnerabilità sarà aumentata di due classi.
- se l'edificio ha subito collassi parziale (D4) o totali (D5), la struttura è considerata "perduta".

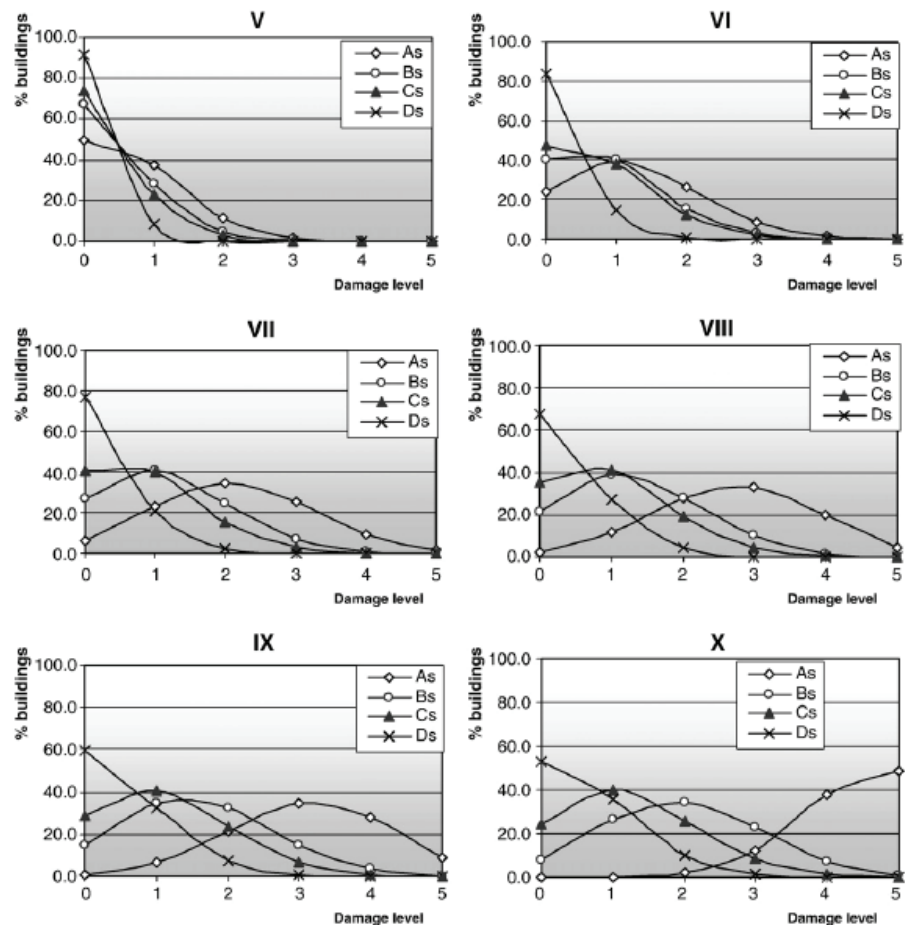


Figura 4. 14. EQ. Funzioni di probabilità di danno per diverse tipologie strutturali.

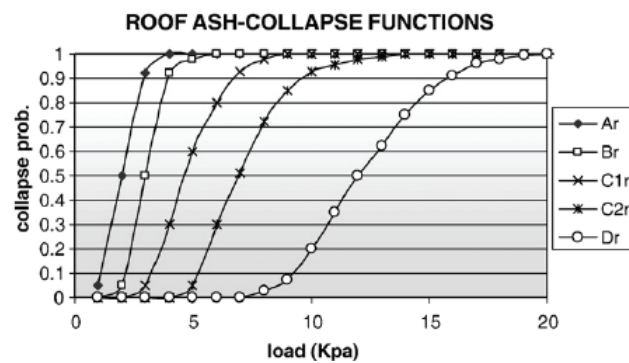


Figura 4. 15. AF. Funzioni di probabilità di collasso per diverse tipologie di coperture.

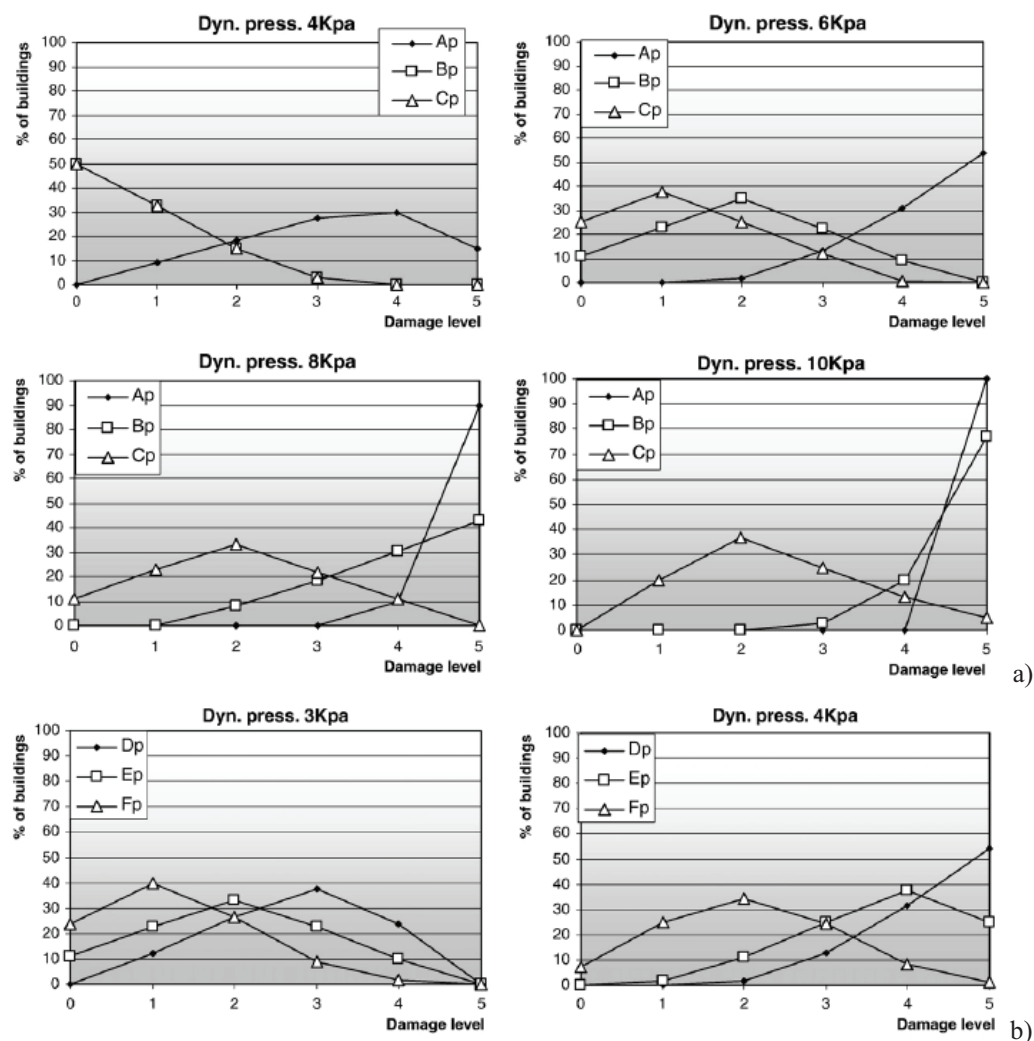


Figura 4. 16. PF. Funzioni di probabilità di danno per diverse tipologie strutturali: a) classi A_p , B_p , C_p (muratura); b) D_p , E_p , F_p (c.a.).

La scheda speditiva *ad hoc* necessaria alla raccolta dei parametri che influenzano la vulnerabilità vulcanica di una generica costruzione è stata messa a punto nell'ambito del progetto europeo EXPLORIS (2002-2005), dal centro PLINIVS (centro Per L'Ingegneria Idrologica, Vulcanica e Sismica, direttore scientifico prof. G. Zuccaro).

La scheda (Tabella 4.5) è divisa nelle otto seguenti sezioni:

1. La sezione IDENTIFICAZIONE localizza l'edificio con riferimento ai parametri geografici forniti dalla regione Campania;
2. La sezione INFORMAZIONI GENERALI si riferisce al tipo (edificio ordinario, magazzino, stazione elettrica, ecc), alla destinazione (ospedale, scuola, ecc), all'uso (interamente utilizzata, parzialmente utilizzata, non utilizzata e abbandonata) ed alla esposizione (ordinaria, strategica, esposta a rischi particolari) della costruzione.
3. La sezione CONDIZIONE si riferisce all'età, allo stato di conservazione della struttura (scarso, mediocre, buono e ottimo) e alla tipologia delle finiture (economico, ordinario, di lusso).
4. La sezione CARATTERISTICHE DESCRITTIVE si riferisce: al numero di piani totale a partire dal piano terra, al numero dei piani fuori terra, compreso l'attico; al numero di appartamenti residenziali; alla presenza di scantinato occupato o meno; all'altezza del primo piano; alle altezze minime e massime di tutti i piani fino alla copertura; alla presenza di ostacoli con altezza superiore ai 2m; all'orientamento (angolo tra la facciata più lunga o la facciata principale e il Nord); ed alla posizione nell'unità all'interno dell'aggregato (Figura 4.17).



Figura 4. 17. Posizione nell'aggregato: a) isolato; b) interna; c) esterna; d) interna d'angolo.

5. La sezione CARATTERISTICHE STRUTTURALI si riferisce: alla tipologia principale (cemento armato, muratura, legno, acciaio e miste); alle strutture verticali (muratura a sacco con o senza rinforzi, muratura di pietre sbozzate, muratura in blocchi di tufo, telaio in c.a. con tamponatura debole o resistente, ecc); alle strutture orizzontali (solaio in legno, solaio con travi in acciaio, solaio in cemento, volte, ecc); allo spessore delle pareti; ed alla tipologia delle facciate continue (blocchi di tufo o pietre squadrate, blocchi di cemento, ecc).
6. La sezione APERTURE si riferisce alla percentuale delle aperture sulla facciata, al numero di finestre piccole, medie e di grandi

dimensioni, al materiale (legno, PVC, alluminio o legno-alluminio, acciaio leggero e acciaio di tipo anti-intrusione), alla loro protezione ed alla loro condizione.

7. La sezione INTERVENTI si riferisce all'età e al tipo di intervento (manutenzione straordinaria, riqualificazione e adeguamento).
8. La sezione REGOLARITA' si riferisce: alla distribuzione di masse e rigidità in pianta ed in elevazione; al tipo di struttura (con singolo o doppio telaio monodirezionale, con singola o doppia parete direzionali, o pareti con telai); alla presenza di piano soffitto (pilotis su una parte del piano terra, piano terra completamente aperto, o piani soffitti intermedi); e alla presenza eventuale di elementi tozzi.

In particolare, le informazioni contenute nella scheda possono essere divise in due gruppi. Il primo contiene i comuni parametri utilizzati per la valutazione della vulnerabilità sismica, infatti, fornisce informazioni sulle principali strutture verticali e orizzontali, sulla regolarità in pianta e in elevazione, sull'età e la conservazione della costruzione e sul numero dei piani. Il secondo gruppo, invece, è specifico del comportamento dell'edificio sotto l'effetto di un'eruzione esplosiva in quanto raccoglie le informazioni relative agli elementi di vulnerabilità nei riguardi dei depositi da caduta (coperture) e dei flussi piroclastici (aperture e tamponature).

Di seguito, nel dettaglio vengono illustrate le differenti sezioni in modo più dettagliato.

Sezione INFORMAZIONI GENERALI.

Tipologie:

- A edificio ordinario;
- B baracca o assimilabile;
- C capannone;
- D impianto sportivo;
- E struttura temporanea;
- F tettoia;
- G rudere;
- H serra;
- I cabina ENEL;
- L prefabbricato leggero;

- Z altro;
- ZZ elemento generico non identificabile come volume.

Tabella 4. 5. Scheda speditiva PLINIVS per la valutazione della vulnerabilità vulcanica.

SEZIONI	DATI
IDENTIFICAZIONE	Numero progressivo dell'aggregato Numero dell'edificio nell'aggregato
INFORMAZIONI GENERALI	Tipo Destinazione Uso Esposizione
CONDIZIONI	Età Stato di conservazione della struttura Tipologia delle finiture
CARATTERISTICHE DESCRITTIVE	Numero di piani Numero di appartamenti Interrati Interrati occupati Altezza del primo piano Altezza minima Altezza massima Recinzione Orientamento Posizione
CARATTERISTICHE STRUTTURALI	Tipologia principale Strutture verticali prevalenti Strutture orizzontali prevalenti Geometria della copertura Struttura della copertura Spessore dei muri Spessore delle tamponature Tipologia delle tamponature
APERTURE	Percentuale di aperture in facciata Numero di finestre piccole Numero di finestre medie Numero di finestre grandi Materiale delle finestre piccole Materiale delle finestre medie Materiale delle finestre grandi Protezione delle finestre piccole Protezione delle finestre medie Protezione delle finestre grandi Condizioni delle aperture
INTERVENTI	Tipo di intervento Età dell'intervento
REGOLARITÀ	Regolarità in pianta Regolarità in elevazione Distribuzione delle tamponature in pianta Distribuzione delle tamponature in altezza Tipo di struttura (telai mono o pluridirez., ecc.) Piano soffice Elementi tozzi

Destinazioni d'uso:

- A struttura agricola;
- ND negozi dettaglio;
- NI negozi ingrosso;
- OM officine meccaniche;
- ST servizi tecnici professionali;
- B banche;
- H ospedali;
- HB cliniche e ambulatori;
- R intrattenimento e ricreazione;
- T teatri;
- PK parcheggi;
- S scuole;
- U università;
- P uffici pubblici;
- PI uffici per il pronto intervento;
- IP industrie pesanti;
- IL industrie leggere;
- IK industrie chimiche;
- IM industrie metallurgiche;
- IT industrie tecnologiche;
- IE industrie per l'edilizia;
- CH chiese ed organizzazioni no profit;
- RE residenza;
- RT alloggi temporanei;
- DD dormitori pubblici;
- HP casa di cura;
- H struttura ricettiva;
- DP deposito;
- NN non noto.

Uso:

- A abbandonato;
- NU non utilizzato;
- PU parzialmente utilizzato;
- U utilizzato.

Esposizione:

- S strategica (caserme, ospedali, scuole, prefetture, ecc.);
- P caratterizzato da particolare esposizione (industrie e simili);
- O ordinaria.

Sezione CONDIZIONE.

Età:

- A antecedente il 1919;
- B 1919-1945;
- C 1946-1960;
- D 1961-1971;
- E 1972-1981;
- F 1982-1991;
- G 1992-2001;
- H successive al 2001.

Stato di conservazione della struttura:

- A scadente;
- B mediocre;
- C buono;
- D eccellente.

Finiture:

- E economiche;
- O ordinarie;
- L lussuose.

Sezione CARATTERISTICHE DESCRITTIVE.

Va indicato il numero totale di piani dell'edificio conteggiati a partire dalla quota di terreno più bassa. L'eventuale sottotetto si esclude dal conteggio a meno che non abbia altezza media che differisce meno del 20% rispetto all'altezza media dei piani sottostanti. Unitamente a ciò va indicato: il numero di abitazioni comprese nell'edificio, il numero di piani fuori terra compreso sottotetto abitabile, il numero di unità abitative se residenziale (0 in caso contrario), il numero di piani interrati specificando quanti di questi sono abitati o abitabili.

Per quanto concerne altre caratteristiche dimensionali, bisogna riportare l'altezza del primo livello dal piano di campagna oltre che la minima e massima altezza di gronda. Va indicata infine la tipologia di recinzione esterna se di altezza non inferiore ai due metri, secondo le seguenti indicazioni:

- A cemento armato;
- B muratura;
- C inferriata;
- D misto.

Per quanto attiene l'orientamento, questo è riferito alla facciata principale ovvero quella dalle maggiori dimensioni, mentre la posizione è così identificata:

- A isolato;
- B interno (chiuso su due lati opposti);
- C esterno (libero su due lati);
- D angolo interno (chiuso su due lati adiacenti);

Nel caso in cui fosse presente un giunto efficace (maggiore di 1/10 di H), l'edificio va definito come appartenente alla classe "A" anche se adiacente ad altri.

Sezione CARATTERISTICHE STRUTTURALI.

Tipologia prevalente:

- A cemento armato;
- B muratura;
- C legno;
- D acciaio;
- E mista.

Strutture verticali:

- A muratura a sacco;
- B muratura a sacco con rinforzi (spigoli, mazzette, ecc.);
- C muratura in pietra sbazzata;
- D muratura in pietra sbazzata con rinforzi c.s.;
- E muratura in pietra arrotondata;
- F muratura in pietra arrotondata con rinforzi c.s.;
- G muratura in blocchetti di tufo o pietra ben squadrata;

- H muratura in blocchetti di calcestruzzo ad inerti ordinari;
- I muratura in blocchetti di calcestruzzo ad inerti leggeri;
- L muratura in mattoni pieni o semipieno (foratura<45%);
- M muratura in mattoni forati;
- N pareti in calcestruzzo non armato;
- O pareti in calcestruzzo armato;
- P telai in c.a. con percentuale ridotta o nulla di tamponature;
- Q telai in c.a. con tamponature deboli;
- R telai in c.a. con tamponature consistenti;
- S ossatura con profilati metallici;
- T1 struttura mista c.a. su muratura;
- T2 struttura mista muratura su c.a.;
- T3 struttura mista combinazione in uno stesso piano delle tipologie A-O con le tipologie P-S;
- U1 legno leggera;
- U2 legno resistente;
- U3 legno lamellare recente.

Strutture orizzontali:

- A solai in legno;
- B solai in legno con catene o tiranti;
- C solai con putrelle metalliche e voltine e tavelloni;
- D solai con putrelle metalliche e voltine o tabelloni con catene o tiranti;
- E solai laterocementizi o solette in c.a.;
- F volte senza catene;
- G volte con catene;
- H combinazione di volte spingenti (F) con solai piani (A-E);
- I combinazione di volte non spingenti (F) con solai piani (A-E);
- L copertura molto leggera in lamierino o fibrocemento.

Strutture di copertura:

- M in legno spingente (generalmente a due falde senza trave di colmo e senza catene o tiranti);
- N in legno poco spingente (ad 1 falda, a 2 falde con muro di spina o con trave di colmo poco deformabile);

- O in legno a spinta eliminata (con catene o tiranti) o con travi orizzontali;
- P con solai laterocementizi o solette in c.a.;
- Q con orditura principale in putrelle metalliche, spingente (analoga al tipo M per legno);
- R con orditura principale in putrelle metalliche, poco spingente (analoga ai tipi N e O per il legno);
- S mista spingente: combinazione dei tipi suddetti con almeno un tipo spingente (MQ);
- T mista non spingente: combinazione dei tipi non spingenti suddetti (N,O,P,R);
- U volte.

Geometri della copertura:

- A piana;
- B a una falda;
- C a più falde;
- D volta.

Per quanto attiene le pareti (strutture in muratura) e le tamponature (strutture intelaiate), vanno riportati gli spessori arrotondati a ± 5 cm. Le tipologie di tamponature individuate per le strutture in calcestruzzo cementizio armato, sono di seguito elencate e classificate:

- G blocchetti di tufo o pietra ben squadrata;
- H blocchetti di calcestruzzo ad inerti ordinari;
- I blocchetti di calcestruzzo ad inerti leggeri;
- L mattoni pieni o semipieni foratura $< 45\%$;
- M mattoni frati;
- N pareti in calcestruzzo non armato;
- O pareti in calcestruzzo armato.

Sezioni APERTURE.

In base alla percentuale di aperture presenti, si descrivono le seguenti classi:

- A $< 10\%$;
- B 10-25%;
- C 25%- 50%;

- $E > 50\%$.

E' necessario inoltre riportare il numero di finestre piccole, medie e grandi, oltre al materiale prevalente di cui sono costituite, classificato come segue:

- A legno;
- B PVC;
- C alluminio o legno-alluminio;
- D ferro debole.
- E ferro forte (tipo anti-intrusione).

La precedente classificazione viene mantenuta anche per quanto riguarda la tipologia di eventuali strutture a protezione degli infissi.

Stato di protezione delle finestre:

- A ottimo;
- B efficiente;
- C scadente;
- D pessimo o mancante.

Sezione INTERVENTI.

Gli interventi di manutenzione ovvero di miglioramento dello stato dell'edificio, possono sensibilmente modificare la risposta strutturale alle sollecitazioni anche di tipo dinamico.

Per tale ragione è importante rilevare tali interventi postumi, andando a definire, oltre alla tipologia, anche l'età degli stessi.

Età degli interventi:

- A antecedenti 1919;
- B 1919-1945;
- C 1946-1960;
- D 1961-1971;
- E 1972-1981;
- F 1982-1991;
- G 1992-2001.

Sezione REGOLARITA'.

Altro aspetto fondamentale in grado di modificare sensibilmente la risposta dell'edificio nei confronti di sollecitazioni dinamiche, è senza dubbio legata alla più o meno spiccata regolarità strutturale ed architettonica. E' necessario

rilevare la regolarità in pianta, in alzato, oltre della distribuzione delle tamponature in pianta e in facciata (questo solo per strutture in c.a.).

Classi possibili:

- R regolare;
- I irregolare.

Distribuzione degli elementi strutturali (solo edifici in c.a.):

- A telai monodirezionali;
- B telai bidirezionali;
- C pareti monodirezionali;
- D pareti bidirezionali;
- E pareti più telai.

Piano soffice:

- A assenza porticato;
- B presenza di porticato su parte del piano terra;
- C piano terra completamente aperto (ad eccezione eventualmente del vano scala);
- D piano debole intermedio.

Elementi tozzi:

- A assenti;
- B scarsamente presenti;
- C significativamente presenti.

4.3. PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ VULCANICA

4.3.1 Metodi multi-criterio

Di seguito (par. 4.3.2) è illustrata una proposta di metodologia speditiva di tipo semeiotico per la valutazione della vulnerabilità vulcanica, basata sui *metodi multi-criterio*.

L'analisi multi- criterio nasce nell'ambito della risoluzione di problemi decisionali gestionali, come sviluppo della *ottimizzazione lineare a singolo criterio*. Nella convinzione che, in un problema decisionale complesso (quale

può essere una VIA), vi possano essere una pluralità di aspetti rilevanti, punti di vista o addirittura decisori che rendono la procedura difficilmente riconducibile ad un unico obiettivo.

L'analisi multi- criterio è un tipo di approccio che include una ricca varietà di tecniche che si basano sul medesimo schema: rendere espliciti i contributi delle diverse opzioni di scelta nei confronti dei diversi criteri o attributi. I *criteri* sono lo strumento attraverso il quale le varie alternative vengono comparate l'un l'altra rispetto all'obiettivo del decisore.

E' bene chiarire che *criteri* e *attributi* sono ritenuti per convenzione sinonimi e sono definiti come indicatori misurabili in modo quantitativo e/o qualitativo delle prestazioni o degli impatti delle alternative analizzate. Più precisamente, un criterio è una funzione reale f tale che appare significativo comparare due alternative a e b di un insieme di alternative A rispetto ad un particolare punto di vista, sulla sola base dei valori di $f(a)$ e $f(b)$. Ne deriva che *analisi multi- criterio* e *analisi multi- attributo* sono anch'essi sinonimi. Nella pratica, si assume anche che l'*analisi multi- obiettivo* sia sinonimo degli altri due; ma nella teoria della Ricerca Operativa, si usa spesso distinguere:

- l'analisi multi- criterio come un problema decisionale inerente un numero finito di alternative;
- l'analisi multi- obiettivo come un problema di scelta tra infinite alternative.

I metodi di analisi a multi- criterio generalmente si suddividono in cinque principali fasi:

1. definizione di una o più matrici di valutazione;
2. normalizzazione della o delle matrici di valutazione;
3. assegnazione di "pesi";
4. calcolo degli ordinamenti;
5. analisi di sensibilità.

In genere, il "nocciolo centrale" del modello è costituito dalla *matrice di valutazione*: una matrice bidimensionale $n \times m$, dove una dimensione rappresenta gli n *obiettivi* (o i *criteri*) e l'altra le m opzioni di scelta (o alternative di progetto, di processo, di luogo, ecc.). In essa vengono registrati $n \times m$ indicatori, che possono avere diverse unità di misura quantitativa (misurazioni), qualitativa (giudizi verbali, numeri con valore ordinale,

simboli), o ancora mista a seconda del criterio considerato (Tabella 4.6). Questa matrice viene anche chiamata: matrice di impatto, matrice di analisi, evaluation matrix, score matrix, appraisal table e può assumere diverse forme (semplice, coassiale, supermatrice, ecc.)

Tabella 4. 6. Esempio di matrice di valutazione di tre Alternative (A1, A2, A3) rispetto a tre Criteri (C1, C2, C3).

	C1	C2	C3
A1	0,4	60	++
A2	0,8	40	-
A3	0,6	65	+

La *normalizzazione* serve per rendere omogenei e operabili i dati contenuti nella matrice. Essa avviene trasformando questi dati in valori che per convenzione sono adimensionali (senza unità di misura) con una o più funzioni logico-matematiche che possono venire raggruppate in due grandi classi: le normalizzazioni lineari e le Funzioni Valore e Utilità.

Le normalizzazioni più comuni del primo tipo sono semplici funzioni matematiche che operano sui valori contenuti in ogni singola riga della matrice.

Le normalizzazioni del secondo tipo sono funzioni che assegnano ad ogni valore dell'indicatore un corrispondente punteggio di merito/preferenza/utilità, compreso in un intervallo prefissato, che per convenzione è di solito posto tra 0 e 1. In letteratura, essa si dice "funzione valore" quando i dati trattati sono di tipo deterministico, e "funzione utilità" quando sono stocastici, ma comunemente sono usate come sinonimo l'una dell'altra.

L'*assegnazione di pesi* relativi ai criteri serve a stabilire un ordine di importanza relativa tra questi ultimi. In pratica i pesi misurano, attraverso valori numerici adimensionali, le priorità che si assegnano ai vari aspetti del problema e per tale motivo non hanno mai valore assoluto ma solo relativo. Ciascun indicatore di solito viene moltiplicato per il rispettivo peso prima di essere aggregato agli altri valori. Quindi, da un punto di vista strettamente tecnico, i pesi rappresentano il Tasso Marginale di Sostituzione tra i vari criteri. Le tecniche di assegnazione dei pesi sono centinaia, ma quelli più semplici e più comunemente usati sono la assegnazione diretta e il confronto a coppie.

Nel primo caso, i pesi vengono assegnati direttamente sulla base di una scala di punteggio prestabilita (da 1 a 100, a 1000, ecc.) o ridistribuendo tra tutti i criteri questo punteggio (tale che la somma dei pesi sia uguale a 100, 1000, ecc.). Nel secondo caso, punteggi della scala vengono assegnati ad ogni criterio confrontandolo con tutti gli altri. Si costruisce così una matrice dei confronti a coppie quadrata e simmetrica rispetto alla diagonale principale, come in Tabella 4.7.

Tabella 4. 7. Esempio di matrice dei paragoni a coppie tra tre Criteri (C1, C2, C3).

	C1	C2	C3
C1	1	1/2	7
C2	2	1	3
C3	1/7	1/3	1

Per convenzione, gli elementi della matrice sono positivi; quelli sotto la diagonale principale sono reciproci di quelli sopra ($c_{ij}=1/c_{ji}$) e quindi i valori della diagonale sono pari all'unità. Ne risulta che il numero di confronti necessari è pari all'area del triangolo superiore destro della matrice, esclusa la diagonale principale, ossia $[(n \times n)/2 - n]$. Questi valori vengono poi aggregati in un vettore finale di pesi attraverso alcune funzioni del tipo: Autovetture Massimo, Minimi Quadrati, ecc.

Meno comuni e più complessi sono i metodi basati solo su un ordine anche incompleto di priorità:

- 1) il Valore Atteso;
- 2) il Valore Estremo;
- 3) i pesi casuali.

In tutti questi metodi, il decisore non esprime nessun giudizio quantitativo sulla importanza di un criterio rispetto ad un altro, ma fornisce, se gli è noto, solo l'ordine di importanza e assume che la somma dei pesi sia uguale a 1.

Infine si *calcolano gli ordinamenti* delle alternative combinando pesi e indicatori rispetto a ciascuna alternativa. I metodi per fare ciò sono moltissimi; i più comuni sono comunque quelli che fanno riferimento a due principali approcci: la somma pesata (metodi prescrittivi), e gli indici di concordanza e discordanza (metodi descrittivi).

La somma pesata (S_i) di una alternativa (A_i) prevede che ogni indicatore (a_{ij}) sia moltiplicato per il peso (w_j) del criterio corrispondente (C_j) e sommato con quelli della stessa riga di appartenenza:

$$S_i = \sum_j w_j \cdot a_{ij} \quad (4.2)$$

Ciò presuppone, ovviamente, che la funzione sia additiva, i criteri indipendenti e gli indicatori quantitativi.

Nel secondo caso, i modelli sono molto complessi perché ammettono la intransitività e incomparabilità delle relazioni di preferenza. Essi si basano sul confronto a coppie di tutte le alternative e misura due diversi “indici”: l’indice di concordanza e quello di discordanza.

Infine, l’*analisi di sensibilità* è un’indagine che si effettua sui risultati del modello di supporto alle decisioni per verificare quali variazioni del modello possono generare differenze sostanziali nelle performance delle alternative. Generalmente, si indagano i valori dei criteri e degli indicatori a cui corrisponde il “punto di inversione”, ossia quando la graduatoria delle alternative si inverte.

E’ particolarmente indicato nei casi d’incertezza e assicura una corretta valutazione di tutti i possibili punti di vista del problema. Vi sono tre principali tipi di analisi di sensibilità: 1) sensibilità sul metodo: si applica un diverso metodo di standardizzazione dei dati e (quando possibile) di computazione dei punteggi finali; 2) sensibilità sui criteri: si aggiungono o si eliminano alcuni criteri di decisione; 3) sensibilità sui pesi (la più applicata): si fanno variare i giudizi di merito di alcuni criteri. La prima serve a controllare la dipendenza dei risultati dal metodo di calcolo. La seconda garantisce la validità dello schema adottato; più in dettaglio, è possibile riscontrare se la gerarchia contiene criteri superflui o, peggio, se mancano criteri fondamentali. La terza permette di constatare il grado di influenza di ogni fattore sulla decisione finale. Inoltre, opportune combinazioni del secondo e terzo metodo permettono di verificare diversi “angoli di incidenza” (punti di vista) del problema.

La proposta di metodologia illustrata nel paragrafo 4.3.2 è basata sull’applicazione dei metodi multi-criterio AHP e Topsis.

Il processo analitico gerarchico *Analytic Hierarchy Process* (AHP) è stato introdotto da Saaty nel 1980 e ripreso successivamente dallo stesso autore nel 1994 e nel 1999. Scopo principale del metodo è quello di costruire una matrice di decisione **D** (Tabella 4.8), avente come generico elemento a_{ij} indicante la misura della prestazione dell'alternativa i -esima rispetto al criterio j -esimo.

Tabella 4. 8. Matrice di decisione **D** (Metodo AHP).

		CRITERI					PUNTEGGIO
		C_1	C_2	C_3	...	C_m	
ALTERNATIVE	A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1m}	$\sum_j w_j \cdot a_{1,j}$
	A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2m}	$\sum_j w_j \cdot a_{2,j}$
	A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3m}	$\sum_j w_j \cdot a_{3,j}$

	A_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	...	a_{nm}	$\sum_j w_j \cdot a_{n,j}$

Costruita la matrice di decisione, il punteggio da associare a ciascuna alternativa ai fini della classifica finale viene determinato, sommando le prestazioni pesate ($a_{ij} \cdot w_j$) di quella alternativa rispetto a tutti i criteri. La migliore alternativa, nel caso di criteri tutti di beneficio è quella che riporta il punteggio massimo; viceversa accade se si tratta di tutti criteri di costo. La generica colonna della matrice di decisione si ricava con il cosiddetto metodo dell'autovalore di Saaty basato su confronti binari. Si tratta in pratica di richiedere al decisore di confrontare le prestazioni di due alternative alla volta A_k e A_p rispetto al criterio in esame e di associare a tale confronto un numero d_{kp} , scelto sulla scala lineare di Saaty (Tabella 4.9).

Tabella 4. 9. Scala lineare Saaty.

Intensità di dominanza, d_{kp}	Definizione
1	Indifferenza
3	Moderata preferenza
5	Forte preferenza
7	Preferenza molto forte
9	Estrema preferenza
2, 4, 6, 8	Giudizi di preferenza intermedi
Reciproci	Per misurare il grado di dominanza inverso

Compilata la matrice si passa alla definizione dell'autovalore principale λ_{MAX} per ogni riga e da qui al peso corrispondente al parametro i -esimo:

$$p = \lambda_{i,\text{MAX}} / \sum_i \lambda_{i,\text{MAX}} \quad (4.3)$$

Il metodo TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarità to Ideal Solution*) è stato sviluppato da Hwang e Yoon nel 1981 come alternativa al metodo ELECTRE e può essere considerato una delle sue varianti più diffusamente accettata ed applicata. Il concetto posto alla base del metodo è che l'alternativa da selezionare dovrebbe avere la minima distanza dalla soluzione ideale e la massima distanza da quella peggiore ideale (indicata nel seguito come *negativa-ideale*). Dunque, scopo ultimo del metodo TOPSIS è quello di definire le due soluzioni virtuali (ideale e negativa-ideale) e di misurare, rispetto a queste, la distanza di ciascuna alternativa reale. Anche il metodo TOPSIS parte dalla conoscenza preventiva della matrice di decisione D (Tabella 4.8). Le fasi che portano all'individuazione della *migliore* alternativa sono descritte nel seguito.

Fase 1: costruzione della matrice di decisione normalizzata $R_{n \times m}$. Tale normalizzazione, necessaria in virtù della presenza (in generale) di diverse unità di misura nella matrice D , si effettua determinando ciascun elemento r_{ij} della matrice R , come indicato nella relazione (4.4).

$$r_{ij} = a_{ij} / (\sum_i a_{ij}^2)^{1/2} \quad (4.4)$$

Fase 2: costruzione della matrice di decisione normalizzata pesata. Ciascuna colonna della matrice decisionale normalizzata R deve essere moltiplicata per il peso del criterio ad essa corrispondente. La matrice normalizzata pesata si indica nel seguito con V .

$$V = [w_j \cdot r_{ij}] = [v_{ij}] \quad (4.5)$$

Fase 3: determinazione della soluzione *ideale* A^+ e della soluzione *negativa-ideale* A^- . Le soluzioni A^+ e A^- sono soluzioni virtuali costruite sulla scorta delle valutazioni normalizzate e pesate contenute nella matrice V . La soluzione ideale A^+ si determina considerando, per ciascun criterio, la migliore

prestazione offerta dalle alternative in gioco. La soluzione A^- si ottiene, invece, combinando le peggiori prestazioni delle alternative rispetto a ciascun criterio. E' chiaro che per "migliore" prestazione si intende il massimo valore offerto dalle alternative, se ci si riferisce ad un criterio di beneficio, il minimo, se invece, si sta facendo riferimento ad un criterio di costo. Viceversa, per la definizione di "peggiore prestazione". Detto allora J_b l'insieme di criteri di beneficio considerati e J_c quello dei criteri di costo, la definizione analitica delle due soluzioni virtuali può essere fornita dalle relazioni (4.6) e (4.7).

$$A^+ = \{(\max v_{ij} \mid j \in J_b), (\min v_{ij} \mid j \in J_c), i = 1, 2, \dots, n, n = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad (4.6)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} \mid j \in J_b), (\max v_{ij} \mid j \in J_c), i = 1, 2, \dots, n, n = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (4.7)$$

Fase 4: calcolo della distanza di ciascuna alternativa (reale) dalle due alternative (virtuali) A^+ e A^- .

Ciascuna delle n alternative (reali) A_i e due alternative (virtuali) A^+ e A^- può essere intesa come un punto in uno spazio a m dimensioni (si ricorda che m è il numero di criteri) ove il generico j -mo asse misuri le prestazioni normalizzate e pesate (del tipo v_{ij}) della considerata alternativa rispetto al criterio C_j . Ciò fatto, la distanza euclidea S_i^+ dell'alternativa A_i ($i=1, 2, \dots, n$) da quella ideale A^+ e quella S_i^- di A_i dalla negativa-ideale A^- possono banalmente ottenersi, per definizione, come nelle (4.8) e (4.9).

$$S_i^+ = [\sum_{j=1, \dots, m} (v_{ij} - v_j^+)^2]^{1/2} \quad (4.8)$$

$$S_i^- = [\sum_{j=1, \dots, m} (v_{ij} - v_j^-)^2]^{1/2} \quad (4.9)$$

Fase 5: determinazione della distanza relativa delle alternative dalla soluzione ideale.

Note le distanze S_i^+ e S_i^- dell'alternativa A_i ($i=1, 2, \dots, n$) dalle soluzioni virtuali A^+ e A^- , rispettivamente, è possibile determinare la distanza relativa dell'alternativa stessa dalla soluzione ideale mediante il seguente rapporto:

$$C_i^+ = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-) \quad (4.10)$$

E' evidente che, se A_i coincide con la soluzione negativa-ideale A^- , risulta $S_i^- = 0$ e, dunque, $C_i^+ = 0$. Viceversa, per $A_i = A^+$ risulta $S_i^+ = 0$ e, dunque, $C_i^- = 1$. In generale è:

$$0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad (4.11)$$

Fase 6: classifica di preferenza delle alternative. Per quanto appena osservato, appare chiaro che una classifica di preferenza delle alternative possa condursi con riferimento proprio al valore che C_i^+ assume per ogni alternativa. In particolare, sono da preferire le soluzioni caratterizzate dal più alto valore C_i^+ . Osservando la struttura (4.10) del rapporto C_i^+ (definito, appunto, *distanza relativa*) è importante notare che, ai fini della classifica delle soluzioni, non conta solo la distanza delle alternative da quella ideale, ma anche quella delle stesse dalla soluzione negativa-ideale. Ebbene, spesso accade che la soluzione migliore (quella caratterizzata, cioè, dal più alto valore di C_i^+) presenta contemporaneamente la distanza minima da A^+ e quella massima da A^- . Tuttavia, in taluni casi tale condizione non si verifica. Si considerino due alternative qualsiasi A_k e A_p . Affinché risulti la prima preferibile alla seconda basta che sia $C_k^+ > C_p^+$, ovvero, sostituendo l'espressione (4.10):

$$S_k^- / (S_k^+ + S_k^-) > S_p^- / (S_p^+ + S_p^-) \quad (4.12)$$

Ebbene, tale disuguaglianza è verificata se risulta:

$$S_k^+ < S_p^+ \quad e \quad S_k^- < S_p^- \quad (4.13)$$

che è la situazione tipica a cui si è fatto cenno, che può anche aversi per:

$$S_k^+ > S_p^+ \quad e \quad S_k^- > S_p^- \quad \text{con} \quad S_k^- < (S_p^+ \cdot S_k^-) / S_p^- \quad (4.14)$$

Dunque l'alternativa A_k potrà risultare migliore dell'alternativa A_p anche se presenta una maggiore distanza dalla soluzione ideale, purché la terza disuguaglianza (4.14) sia rispettata e, cioè, se A_k risulta anche significativamente più distante da A^- rispetto ad A_p .

Al termine della procedura decisionale sarà condotta un'analisi di *sensibilità* del risultato nei confronti dei valori assegnati ai pesi dei criteri di giudizio. Tale analisi valuta la *stabilità* della soluzione ottima nei confronti dei pesi stessi e mira ad accertarsi che la soluzione stessa non cambi in corrispondenza di piccole modifiche nel valore dei pesi. Se così non fosse, infatti, la scelta della migliore alternativa risulterebbe condizionata in modo inaccettabile dalle particolari scelte del decisore in termini di importanza relativa dei criteri, al punto da mettere seriamente in discussione il significato stesso del risultato conseguito.

Il primo passo da compiere sarà, allora, considerare un criterio alla volta e determinare l'intervallo di valori, compresi tra 0 ed 1, che il corrispondente peso può assumere senza che la soluzione finale cambi. La variazione assoluta del generico peso necessaria per giungere ad una soluzione diversa da quella individuata con i pesi scelti, viene indicata generalmente con la sigla A_T che sta per *Absolute Top* (*absolute* indica che trattasi di una variazione assoluta del valore; *top*, che tale variazione comporta il mutare dell'alternativa di vertice in classifica). Successivamente si rapporta, per ciascun criterio, la variazione A_T per il peso del criterio in esame, ottenendo la variazione relativa o percentuale P_T (*Percentage Top*) che quel peso deve subire affinché cambi la soluzione prima in classifica. La misura della *sensibilità* della soluzione al peso del generico criterio si effettua calcolando il reciproco del valore P_T corrispondente. E' ovvio che la soluzione individuata sarà giudicata tanto più stabile quanto più ampi sono i valori di A_T e P_T e, dunque, piccoli i valori di *sensibilità* per ciascun criterio. I criteri per i quali non risulta definibile il valore di A_T in quanto il peso corrispondente, pur assumendo valori qualsiasi compresi tra 0 e 1, non determina un cambio della soluzione ottima individuata, vengono definiti *robusti*. Ai criteri robusti corrisponde, ovviamente, *sensibilità nulla* della soluzione finale al peso corrispondente. Individuare un numero consistente di criteri robusti tra quelli adottati porta a concludere che la soluzione del problema decisionale è sufficientemente stabile ed è poco influenzata dalle scelte personali del decisore.

4.3.2 Proposta di metodologia speditiva

La proposta di metodologia speditiva per la valutazione della vulnerabilità vulcanica ora illustrata è di tipo semeiotico.

Essa assegna a ciascun edificio analizzato un indice di vulnerabilità I_V che viene determinato attraverso una combinazione pesata di elementi di vulnerabilità nei confronti delle azioni vulcaniche, in accordo con i metodi dell'analisi multi- criterio.

A differenza del metodo EXPLORIS (par. 4.2), l'approccio indicato non fa riferimento a classi di vulnerabilità diverse per singoli fenomeni eruttivi (EQ, AF, PF), ma individua un indicatore di vulnerabilità globale, che compendia l'effetto di ogni singolo evento conseguente un'eruzione, anche con riferimento ai beni monumentali.

Gli elementi di vulnerabilità assunti (Tabella 4.10) coincidenti con i criteri dei metodi multi- criterio, derivano da una integrazione della scheda PLINIVS (Tabella 4.5) con gli elementi di vulnerabilità sismica, presenti nella scheda GNDT di II livello (par. 4.1.2) per gli edifici in c.a. e nella MEDEA (par. 4.1.3) per quelli in muratura, e gli elementi di vulnerabilità propri dei beni monumentali presenti nella scheda PALAZZI (par. 4.1.3).

I suddetti parametri vengono combinati e pesati in accordo con i metodi AHP e Topsis. Nello specifico, l'approccio presuppone una triplice applicazione del metodo, con riferimento a:

- Valutazione della vulnerabilità sismica;
- Valutazione della vulnerabilità vulcanica;
- Valutazione della vulnerabilità nel caso dei beni monumentali.

Nella prima fase, vulnerabilità sismica e vulcanica sono trattate separatamente perché, in genere, ogni eruzione è preceduta da un terremoto, dunque, la vulnerabilità è determinata attraverso il cumularsi degli eventi, prima sismico e poi eruttivo. Trattazione separata è dedicata anche ai parametri specifici dei beni monumentali per l'impossibilità di confronto tra elementi di vulnerabilità strutturali e non (struttura verticale e orizzontale, aperture, tamponature, ecc.) e quelli artistici (quadri, mosaici, affreschi, ecc.).

Nella fase finale, gli indici di vulnerabilità sismico (I'_{VS}), vulcanico (I'_{VV}) e da bene monumentale (I'_{BM}) derivanti dall'applicazione dei tre approcci separati vengono combinati per il calcolo della vulnerabilità vulcanica di edifici ordinari (I_{VV}) e monumentali ($I_{VV,BM}$), in accordo con le seguenti relazioni:

$$I_{VV} = \frac{S_{i,VV}^+}{S_{i,VV}^+ + S_{i,VV}^-} \quad (4.15)$$

$$I_{VV,BM} = \frac{S_{i,VV,BM}^+}{S_{i,VV,BM}^+ + S_{i,VV,BM}^-} \quad (4.16)$$

Avendo indicato con $S_{i,*}^+$ e $S_{i,*}^-$:

$$S_{i,VV}^+ = \sqrt{(I_{VS} - A_S^+)^2 + (I_{VV} - A_V^+)^2} \quad (4.17)$$

$$S_{i,VV}^- = \sqrt{(I_{VS} - A_S^-)^2 + (I_{VV} - A_V^-)^2} \quad (4.18)$$

$$S_{i,VV,BM}^+ = \sqrt{(I_{VS} - A_S^+)^2 + (I_{VV} - A_V^+)^2 + (I_{VBM} - A_{BM}^+)^2} \quad (4.19)$$

$$S_{i,VV,BM}^- = \sqrt{(I_{VS} - A_S^-)^2 + (I_{VV} - A_V^-)^2 + (I_{VBM} - A_{BM}^-)^2} \quad (4.20)$$

Nelle Tabelle 4.11-4.13 sono indicate le tre matrici dei pesi, sismica, vulcanica e da beni monumentali, valutate attraverso il metodo AHP e in base alla scala di Saaty, con un confronto binario tra i criteri. Il peso attribuito a ciascun parametro è calcolato attraverso la seguente relazione applicata a ciascuna riga della matrice dei pesi:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}} \quad (4.17)$$

Per maggior chiarezza, i pesi relativi ai tre approcci sono riportati in Tabella 4.14.

L'applicazione completa del metodo, con la determinazione delle tre matrici di decisione **D** (par. 4.3.1) e degli indici di vulnerabilità, è esemplificata nel cap. 6, attraverso l'esame di due casi studio: le scuole in c.a. di Torre del Greco e le Ville del Miglio d'oro, importante porzione del patrimonio storico-artistico dell'area circostante il vulcano partenopeo.

Tabella 4. 10. Proposta di scheda speditiva per la valutazione della vulnerabilità vulcanica.

SCHEDA PLINIVS		PARAMETRI AGGIUNTIVI
SEZIONI	DATI	
IDENTIFICAZIONE	Numero progressivo dell'aggregato Numero dell'edificio nell'aggregato	MURATURE EV1: Assenza di connessioni tra pareti ortogonali e/o catene o cordoli ai vari livelli; EV3: Presenza di pavimenti mal collegati con le pareti; EV4: Muratura di scarsa qualità, area resistente ridotta lungo una o più direzioni; EV5: Alta percentuale di finestre; EV8: Presenza di corpi aggiunti con differente rigidità e/o con collegamenti localizzati; EV9: Variazione del sistema resistente ai piani superiori; EV10: Presenza di una sopraelevazione e/o di una struttura di copertura rigida e mal collegata; EV11: Presenza di un piano sfalsato; EV12: Eccessiva distanza tra muri e controvento; EV13: Copertura spingente e/o assenza di connessioni della parete alla copertura; EV14: Presenza di architrave con ridotta rigidità di inflessione o con inadeguato lunghezza di appoggio; EV15: Presenza di archi ribassati e/o piattabande con imposte inadeguate; EV16: Riduzione localizzata della sezione muraria (presenza di canne fumarie, nicchie, etc); EV17: Discontinuità localizzate (chiusura vecchie aperture, sarciture mai realizzate); EV19: Presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura.
INFORMAZIONI GENERALI	Tipo Destinazione Uso Esposizione	
CONDIZIONI	Età Stato di conservazione della struttura Tipologia delle finiture	
CARATTERISTICHE DESCRITTIVE	Numero di piani Numero di appartamenti Interrati Interrati occupati Altezza del primo piano Altezza minima Altezza massima Recinzione Orientamento Posizione	
	Tipologia principale Strutture verticali prevalenti Strutture orizzontali prevalenti Geometria della copertura Struttura della copertura Spessore dei muri Spessore delle tamponature Tipologia delle tamponature	
APERTURE	Percentuale di aperture in facciata Numero di finestre piccole Numero di finestre medie Numero di finestre grandi Materiale delle finestre piccole Materiale delle finestre medie Materiale delle finestre grandi Protezione delle finestre piccole Protezione delle finestre medie Protezione delle finestre grandi Condizioni delle aperture	CEMENTO ARMATO Collegamento copertura- struttura Interasse pilastre
INTERVENTI	Tipo di intervento Età dell'intervento	BENI MONUMENTALI Quadri Mosaici Statue Libri Modanature Arredi Suppellettili Altro
REGOLARITÀ	Regolarità in pianta Regolarità in elevazione Distribuzione delle tamponature in pianta Distribuzione delle tamponature in altezza Tipo di struttura Piano soffice Elementi tozzi	

Tabella 4. 11. Matrice dei pesi dei criteri sismici per le strutture in muratura.

		PESI PARAMETRI																										
numero piani		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	stato di conservazione della struttura			C8	C9	regolarità in pianta		tipo interventi		tipo di esposizione			posizione rispetto ad altri edifici							
struttura copertura		0,009	0,008	0,010	0,131	0,017	0,013	0,107	0,016	0,016	0,065	0,012	0,013	0,069	0,066	0,062	0,060	0,052	0,045	0,041	0,035	0,032	0,028	0,024	0,021	0,019	0,016	0,014
struttura elementi orizzontali		0,9%	0,8%	1,0%	13,1%	1,7%	1,3%	10,7%	1,6%	1,6%	6,5%	1,2%	1,3%	6,9%	6,6%	6,2%	6,0%	5,2%	4,5%	4,1%	3,5%	3,2%	2,8%	2,4%	2,1%	1,9%	1,6%	1,4%
livello di progettazione antisismica		C 1	1	3	1/5	1/3	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/3	1/6	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
struttura elementi verticali		C 2	1/3	1	1/4	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/4	1/6	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
struttura elementi orizzontali		C 3	3	4	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/3	1/6	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
livello di progettazione antisismica		C 4	5	5	3	1	5	6	3	3	3	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
strutture verticali		C 5	3	5	3	1/5	1	4	1/5	3	1/2	6	3	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
strutture strutture verticali		C 6	4	5	3	1/6	1/4	1	1/3	1/3	1/3	3	2	3	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
stato di conservazione della struttura		C 7	3	3	3	1/3	5	3	1	5	5	1/2	3	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
regolarità in altezza		C 8	3	5	3	1/3	1/3	3	1/5	1	1/3	4	3	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2
regolarità in piano		C 9	3	3	3	1/3	1/3	3	1/5	1	1/3	4	3	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2
tipo interventi		C 10	2	3	3	1/3	2	1/3	2	3	3	1	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
tipo di esposizione posizione rispetto ad altri edifici		C 11	2	2	2	1/5	1/6	1/2	1/3	1/4	1/4	1/3	1	1/2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2
EV1		C 12	3	4	3	1/6	1/3	1/4	1/3	1/3	1/4	2	1	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2
EV3		C 13	6	6	6	1/6	6	6	1/6	4	4	1/3	4	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
EV4		C 14	6	6	6	1/6	6	6	1/6	4	4	1/3	4	4	1/2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
		C 15	6	6	6	1/6	6	6	1/6	4	4	1/3	4	4	1/2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
EV5		C 16	6	6	6	1/6	5	6	1/6	4	4	1/3	4	4	1/2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
EV8		C 17	5	5	5	1/6	5	5	1/6	4	4	1/3	4	4	1/2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
EV9		C 18	5	5	5	1/6	5	5	1/6	4	4	1/3	4	4	1/2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5
EV10		C 19	5	5	5	1/6	4	5	1/6	3	3	1/3	3	3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	2	2	2	3	3	3	4
EV11		C 20	4	4	4	1/6	4	4	1/6	3	3	1/3	3	3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	2	2	2	3	3	3	4
EV12		C 21	4	4	4	1/6	4	4	1/6	3	3	1/3	3	3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	2	2	2	2	3	3	3	4
EV13		C 22	4	4	4	1/6	3	4	1/6	3	3	1/3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	2	3
EV14		C 23	3	3	3	1/6	3	3	1/6	3	3	1/3	2	2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	2	3
EV15		C 24	3	3	3	1/6	3	3	1/6	2	2	1/3	2	2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	2	3
EV16		C 25	3	3	3	1/6	2	3	1/6	2	2	1/3	2	2	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	2	3
EV17		C 26	2	2	2	1/6	2	2	1/6	2	2	1/3	2	2	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1
EV19		C 27	2	2	2	1/6	2	2	1/6	2	2	1/3	2	2	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1

Tabella 4. 12. Matrice dei pesi dei criteri vulcanici.

		numero piani	orientamento facciata più a rischio	posizione rispetto ad altri edifici	distanza dal cratere	tipologia strutture verticali	spessore strutture verticali	struttura copertura	stato di conservazione della struttura	regolarità in pianta	regolarità in altezza	tipo di esposizione	percentuale di bucatore in facciata esposta	numero di aperture piccole	numero di aperture medie	numero di aperture grandi	stato di conservazione degli infissi	protezione infissi
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
PESI PARAMETRI		0,018	0,045	0,023	0,078	0,030	0,030	0,044	0,038	0,021	0,021	0,018	0,162	0,099	0,127	0,145	0,104	0,000
		1,8%	4,5%	2,3%	7,8%	3,0%	3,0%	4,4%	3,8%	2,1%	2,1%	1,8%	16,2%	9,9%	12,7%	14,5%	10,4%	0,0%
numero piani	C 1	1	1/5	1/6	1/6	1/4	1/4	1/5	1/5	1/3	1/3	2	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
orientamento facciata più a rischio	C 2	5	1	5	1/5	4	4	4	4	5	5	5	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
posizione rispetto ad altri edifici	C 3	6	1/5	1	1/6	1/4	1/4	1/6	1/4	3	3	3	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
distanza dal cratere	C 4	6	5	6	1	5	5	5	5	6	6	6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
tipologia strutture verticali	C 5	4	1/4	4	1/5	1	1	1/4	1/3	3	3	4	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
spessore strutture verticali	C 6	4	1/4	4	1/5	1	1	1/4	1/3	3	3	4	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
struttura copertura	C 7	5	5	6	1/5	4	4	1	1/2	5	5	5	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
stato di conservazione della struttura	C 8	5	1/4	4	1/5	3	3	2	1	5	5	6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
regolarità in pianta	C 9	3	1/5	1/3	1/6	1/3	1/3	1/5	1/5	1	1	1/2	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
regolarità in altezza	C 10	3	1/5	1/3	1/6	1/3	1/3	1/5	1/5	1	1	1/2	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
tipo di esposizione	C 11	1/2	1/5	1/3	1/6	1/4	1/4	1/5	1/6	2	2	1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7
percentuale di bucatore in facciata esposta	C 12	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	1	3	3	3	3	1/3
numero di aperture piccole	C 13	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	1/3	1	1/3	1/3	1/2	1/3
numero di aperture medie	C 14	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	1/3	3	1	1/3	4	1/3
numero di aperture grandi	C 15	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	1/3	3	3	1	4	1/3
stato di conservazione degli infissi	C 16	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	1/3	2	1/4	1/4	1	1/3
protezione infissi	C 17	7	7	7	3	7	7	7	6	7	7	7	3	3	3	3	3	1

Tabella 4. 13. Matrice dei pesi dei criteri relativi ai beni artistici.

		Affreschi		Mosaici		Quadri		Libri		Statue		Arredi		Suppellettili		Stucchi		Modanature	
		qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità	qualità	quantità
PESI PARAMETRI		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
		0,132	0,104	0,137	0,044	0,135	0,049	0,086	0,034	0,063	0,027	0,034	0,017	0,030	0,016	0,035	0,013	0,030	0,013
		13,2%	10,4%	13,7%	4,4%	13,5%	4,9%	8,6%	3,4%	6,3%	2,7%	3,4%	1,7%	3,0%	1,6%	3,5%	1,3%	3,0%	1,3%
Affreschi	qualità	C 1	1	2	1	2	1	2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6
	quantità	C 2	1/2	1	1/2	1	1/2	1	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6
Mosaici	qualità	C 3	2	2	1	2	1	2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6
	quantità	C 4	1/2	1	1/2	1	1/3	1	1/2	2	1/2	3	1/2	4	1/2	4	1/2	5	1/2
Quadri	qualità	C 5	1	2	1	3	1	2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6
	quantità	C 6	1/2	1	1/2	1	1/2	1	1/2	3	1/2	4	1/2	5	1/2	5	1/2	6	1/2
Libri	qualità	C 7	1/3	1/3	1/3	2	1/3	2	1	2	3	4	4	5	4	5	6	5	6
	quantità	C 8	1/3	1/3	1/3	1/2	1/3	1/2	1	1/2	3	1/2	4	1/2	4	1/2	4	1/2	4
Statue	qualità	C 9	1/4	1/4	1/4	2	1/4	2	1/3	2	1	2	3	3	4	4	5	5	5
	quantità	C 10	1/4	1/4	1/4	1/3	1/4	1/4	1/3	1	1	1/2	3	1/2	4	1/2	5	1/2	5
Arredi	qualità	C 11	1/5	1/5	1/5	2	1/5	2	1/4	2	1/3	2	1	2	1	2	1/3	2	2
	quantità	C 12	1/5	1/5	1/5	1/4	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1	1/2	1	1/2	2	1/2	2
Suppellettili	qualità	C 13	1/5	1/5	1/5	1/4	1/5	2	1/4	2	1/4	2	1	2	1	2	2	2	2
	quantità	C 14	1/5	1/5	1/5	1/4	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/2	1	1/2	1	1/2	2	1/2	1
Stucchi	qualità	C 15	1/6	1/6	1/6	2	1/6	2	1/5	2	1/5	2	3	2	2	1	2	1	2
	quantità	C 16	1/6	1/6	1/6	1/5	1/6	1/6	1/4	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1	2
Modanature	qualità	C 17	1/6	1/6	1/6	2	1/6	2	1/5	2	1/5	2	1/2	2	1/2	2	1	2	1
	quantità	C 18	1/6	1/6	1/6	1/5	1/6	1/6	1/4	1/5	1/5	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1	1/2	1

Tabella 4. 14. Pesi dei criteri per le analisi di vulnerabilità sismica, vulcanica e da beni monumentali.

VULNERABILITÀ SISMICA		VULNERABILITÀ VULCANICA		VULN. BENI MONUMENTALI	
Criteri	Pesi [%]	Criteri	Pesi [%]	Criteri	Pesi [%]
Numero piani	0,9	Numero piani	1,8	Affreschi	qualità 13,2
Struttura copertura	0,8	Orient. facciata più a rischio	4,5		quantità 10,4
Elementi orizzontali	1,0	Posizione rispetto ad altri edifici	2,3	Mosaici	qualità 13,7
Liv. di prog. antisismica	13,1	Distanza dal cratere	7,8		quantità 4,4
Strutture verticali	1,7	Tipologia strutture verticali	3,0	Quadri	qualità 13,5
Spess. strutture verticali	1,3	Spessore strutture verticali	3,0		quantità 4,9
Conservazione struttura	10,7	Struttura copertura	4,4	Libri	qualità 8,6
Regolarità in altezza	1,6	Conservazione della struttura	3,8		quantità 3,4
Regolarità in pianta	1,6	Regolarità in pianta	2,1	Statue	qualità 6,3
Tipo interventi	6,5	Regolarità in altezza	2,1		quantità 2,7
Tipo di esposizione	1,2	Tipo di esposizione	1,8	Arredi	qualità 3,4
Pos. rispetto ad altri edifici	1,3	% bucatore in facciata esposta	16,2		quantità 1,7
EV1	6,9	Numero di aperture piccole	9,9	Suppellet.	qualità 3,0
EV3	6,6	Numero di aperture medie	12,7		quantità 1,6
EV4	6,2	Numero di aperture grandi	14,5	Stucchi	qualità 3,5
EV5	6,0	Conservazione degli infissi	10,4		quantità 1,3
EV8	5,2	Protezione infissi	18,4	Modanature	qualità 3,0
EV9	4,5				quantità 1,3
EV10	4,1				
EV11	3,5				
EV12	3,2				
EV13	2,8				
EV14	2,4				
EV15	2,1				
EV16	1,9				
EV17	1,6				
EV19	1,4				

4.3.2 Proposta di metodologia meccanica

La valutazione delle prestazioni strutturali nei confronti delle azioni eccezionali, come le eruzioni vulcaniche, richiede l'uso di metodi sofisticati che tengano conto del comportamento dei materiali e degli elementi strutturali in condizioni estreme, quali alte temperature, elevate pressioni dinamiche, impatto, ecc.).

Quando una struttura subisce gravi danni, nel linguaggio tecnico si può dire che l'integrità strutturale della costruzione è stata parzialmente o totalmente violata e, dunque, che gli elementi strutturali hanno esaurito la loro *robustness*.

In realtà, a partire dalla fase di progettazione di una struttura, esiste una distinzione tra "capacità richieste", derivanti dalle condizioni di carico che si chiede alla struttura di resistere, e la "capacità disponibile", che la struttura realmente possiede.

La valutazione “requisito versus disponibilità” è alla base della progettazione strutturale. Generalizzando, l'integrità strutturale quantifica la capacità necessaria a che la struttura resista ad una assegnata condizione di carico all'interno di un certo stato limite. Nel caso in cui l'azione è “eccezionale”, la capacità richiesta alla struttura corrisponde ad un certo livello di danno, valutabile attraverso l'approccio del Performance Based Design. Quando la situazione diventa “estrema”, il livello di performance assunto corrisponde al “collasso”.

La *robustness* è la capacità di carico complessiva che una struttura o un elemento strutturale è in grado di fornire, in base alle proprie caratteristiche di resistenza e rigidità/duttilità. Essa, essendo indipendente da specifiche condizioni di carico, coincide con la capacità disponibile e può essere utile nella stima degli effetti da situazioni estreme.

Nel caso di eventi eccezionali, è più propriamente una questione di “integrità strutturale versus *robustness*”. In particolare, se ad essere interessati dall'evento sono edifici storici, si rendono necessari ancora di più approcci maggiormente raffinati di quelli ordinari, che riescano a tener conto dello stato di conservazione dei materiali e degli elementi strutturali e della presenza di specifici dettagli costruttivi, che possono avere una forte influenza sulle prestazioni strutturali. Quindi l'approccio 'integrità strutturale / robustness-Performance Based Design può essere più propriamente definito come *Robustness Based Design*.

L'esposizione ad eventi eccezionali può produrre danneggiamento di uno o più elementi strutturali e di conseguenza collasso della costruzione (conseguenze dirette) o perdita di funzionalità del sistema (conseguenze indirette).

Il rischio generato può essere calcolato in relazione ad ogni scenario possibile, moltiplicando la conseguenza di ogni scenario con la relativa probabilità di accadimento e quindi integrando su tutte le variabili casuali degli eventi possibili. Un sistema è considerato affidabile se i rischi indiretti non contribuiscono in maniera significativa al rischio totale (sia diretti che indiretti). La frazione di rischio complessivo risultante da conseguenze dirette è definibile attraverso il seguente indice di robustezza I_{ROB} :

$$I_{ROB} = \frac{R_{DIR}}{R_{DIR} + R_{IND}} \quad (4.21)$$

I_{ROB} è compreso tra 0 ed 1, a seconda della fonte di rischio. Se il sistema è completamente affidabile e non ci sono rischi dovuti a conseguenze indirette, quindi $I_{ROB}=1$, mentre se tutti i rischi sono dovuti a conseguenze indirette, quindi $I_{ROB}=0$.

Questo approccio generale è stato particolarizzato da Mazzolani et al. (2007) in una procedura deterministica per la definizione della robustness come riserva della struttura necessaria a preservarne l'integrità strutturale.

Considerando l'azione ideale A, che produce un modello globale di danno D sulla struttura, rappresentato attraverso la cosiddetta curva di performance strutturale SPC (curva resistenza R, danno D), l'indice di robustness I_r può essere definito come il rapporto tra la massima energia "diretta" assorbita dalla struttura (associata al massimo danni diretto $D_{dir,u}$ che la struttura è in grado di resistere) e l'energia totale assorbita dalla struttura (associata al danno D_{tot} , realmente subito a causa della manifestazione di carico, sia per effetto dei danni diretti che di quelli indiretti (Figura 4.18):

$$I_r = \frac{\int_0^{D_{dir,u}} R dD}{\int_0^{D_{tot}} R dD} \quad (4.22)$$

Ai fini dei calcoli, l'equazione (4.22) può anche essere calcolata in modo approssimato come:

$$I_r = \frac{\int_0^{D_{dir,u}} R dD}{\int_0^{D_{tot}} R dD} \cong \gamma \frac{D_{dir,u}}{D_{tot}} \cdot \frac{R_u}{R_d} \quad (4.23)$$

dove: R_u e R_d sono, rispettivamente, le resistenze strutturali finale e di progetto per una assegnata curva nominale della domanda di prestazioni PDC (Figura 4.18), mentre γ è un coefficiente che dipende dalla forma della

curva di performance SPC, che, nella maggior parte dei casi è compreso tra 1.1 e 1.3.

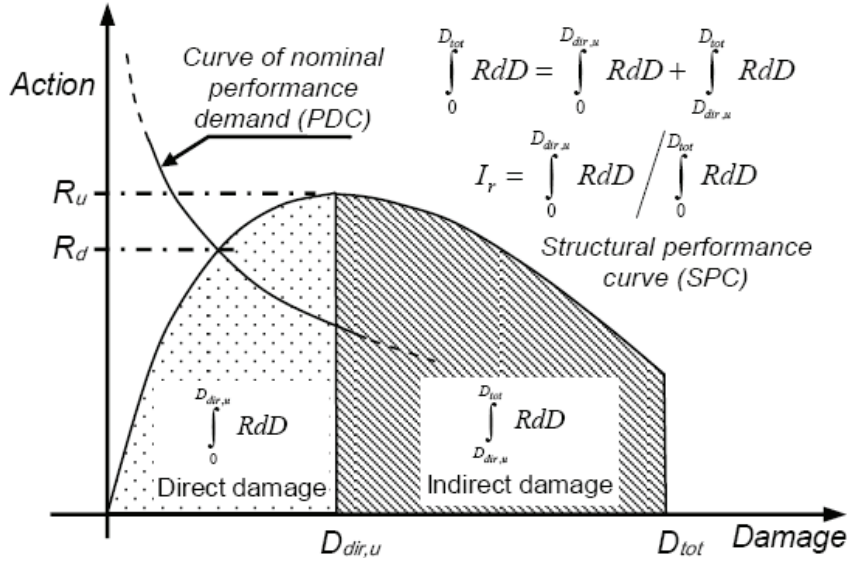


Figura 4. 18. Definizione danni diretti e indiretti.

Definendo l'indice di integrità strutturale I_{si} come il rapporto tra $D_{dir,u}$ e D_{tot} :

$$I_r \cong \gamma \frac{D_{dir,u}}{D_{tot}} \cdot \frac{R_u}{R_d} = \gamma I_{si} \frac{R_u}{R_d} \quad (4.21)$$

Per una data curva PDC, sono possibili tre situazioni:

1. La curva SPC è sotto la PDC (Figura 4.19a), dunque $D_{tot} = D_{dir,u} + D_{ind}$, il che significa $I_{si} < 1$ ed $I_r < 1$, da cui:

$$\int_0^{D_{tot}} R dD = \int_0^{D_{dir,u}} R dD + \int_{D_{dir,u}}^{D_{tot}} R dD I_r \quad (4.22)$$

2. La curva SPC incontra la PDC (Figura 4.19b) con $D_{dir,u} = D_{tot}$, il che significa $I_{si} = I_r = 1$. In questo caso nel punto di intersezione tra le due curve risulta $dA/dD = 0$, quindi:

$$\int_0^{D_{tot}} R dD = \int_0^{D_{dir,u}} R dD \quad (4.22)$$

3. La curva SPC incontra la PDC (Figura 4.19c) con $D_{dir,u} > D_{tot}$ e $D_{tot} = D_{dir,d}$, il che significa $I_{si} > 1$ ed $I_r > 1$. In questo caso nel punto di intersezione tra le due curve risulta $dA/dD > 0$, quindi:

$$\int_0^{D_{tot}} R dD = \int_0^{D_{dir,d}} R dD \quad (4.23)$$

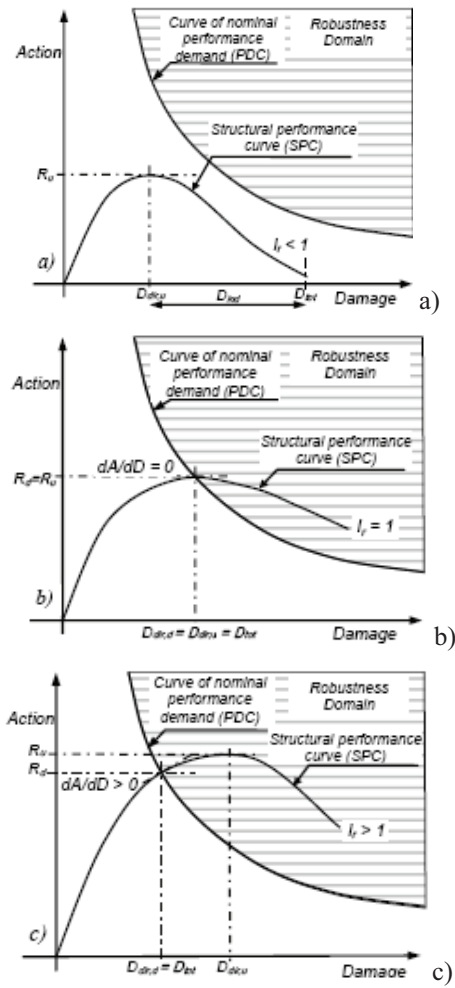


Figura 4. 19. Curva nominale della domanda di performance (PDC) e curva di performance strutturale (SPC): a) SPC sottesa a PDC; b) SPC interseca PDC con $D_{dir,u} = D_{tot}$; c) SPC interseca PDC con $D_{dir,u} > D_{tot}$.

La condizione $I_r > 1$ permette di eventuali modifiche della curva PDC a causa di azioni accidentali inaspettate, con un minor rischio di subire danni indiretti.

I possibili livelli di robustness, nell'ambito del Robustness Based Design (RBD) possono essere definiti attraverso la matrice di performance multi-livello indicata in Tabella 4.15.

Tabella 4. 15. Matrice di performance relativa ai livelli di robustness.

LIVELLO DI PERFORMANCE	NOMINAL DESIGN CAPACITY			ROBUSTNESS CAPACITY			
	FO	O	LS	R1	R2	...	CP
Evento frequente	★						
Evento occasionale	■	★					
Evento raro	▲	■	★				
Evento molto raro o catastrofico		▲	■	★	★	★	★

Capitolo 5

Aree campione all'interno dell'area vesuviana

5.1. ATTIVITÀ DI RILIEVO NELL'AMBITO DEL PROGETTO COST ACTION C26

5.1.1 *Aree d'indagine*

Il complesso vulcanico del *Somma-Vesuvio*, è localizzato a circa 10km da Napoli. Nel corso della sua storia, ha sempre rappresentato un serio pericolo per la popolazione che vive in sua prossimità (Figura 5.1). Negli ultimi 20000 anni, ha prodotto sette eruzioni Pliniane e sub-Pliniane, oltre a numerosi eventi di piccola importanza, causando morte e distruzione. L'alto rischio vulcanico dell'area vesuviana è frutto della combinazione di tre fattori: l'elevato valore esposto, a causa della abnorme densità abitativa (circa 600000 abitanti in un'area di raggio di 7-8km dal cratere); l'alta probabilità che un'eruzione di grande o media scala si verifichi nella prossima decade; e la vulnerabilità dell'aggregato urbano investito dell'evento eruttivo.

L'elevata pericolosità del vulcano partenopeo ha suggerito l'inclusione dell'analisi del rischio Vesuvio all'interno del programma del Group 4 "Risk Assessment for Catastrophic Scenarios in Urban Area", del progetto Europeo COST Action C26 '*Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events*' (2006-2010). Gli obiettivi sono sostanzialmente due: valutare la vulnerabilità

vulcanica degli insediamenti urbani nei riguardi di una probabile eruzione vesuviana e proporre semplici ed economici interventi di mitigazione.

Allo scopo di identificare le tipologie costruttive tipiche dell'area vesuviana, all'interno del progetto COST sono state organizzate due campagne di rilevamento.

La prima campagna, tenutasi nel gennaio 2008, ha riguardato aree localizzate nella città vesuviana a maggiore densità abitativa, *Torre del Greco* (Tabella 5.1).

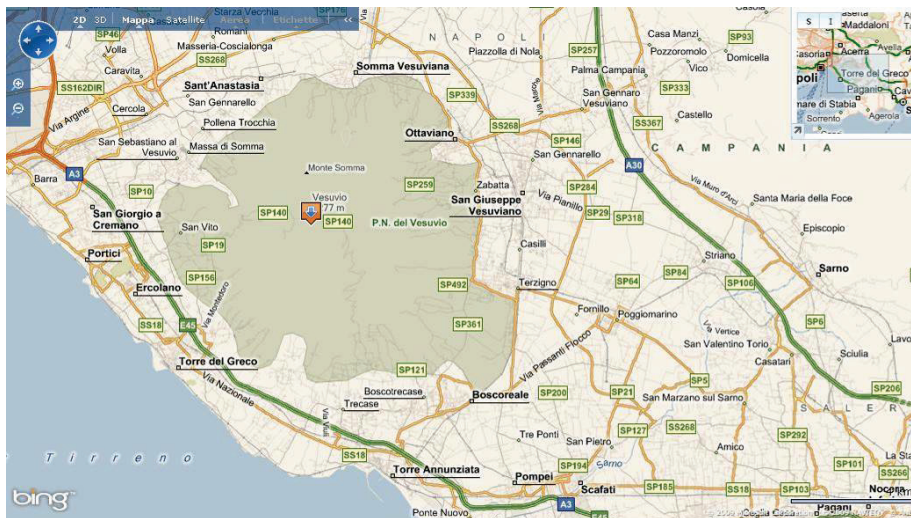


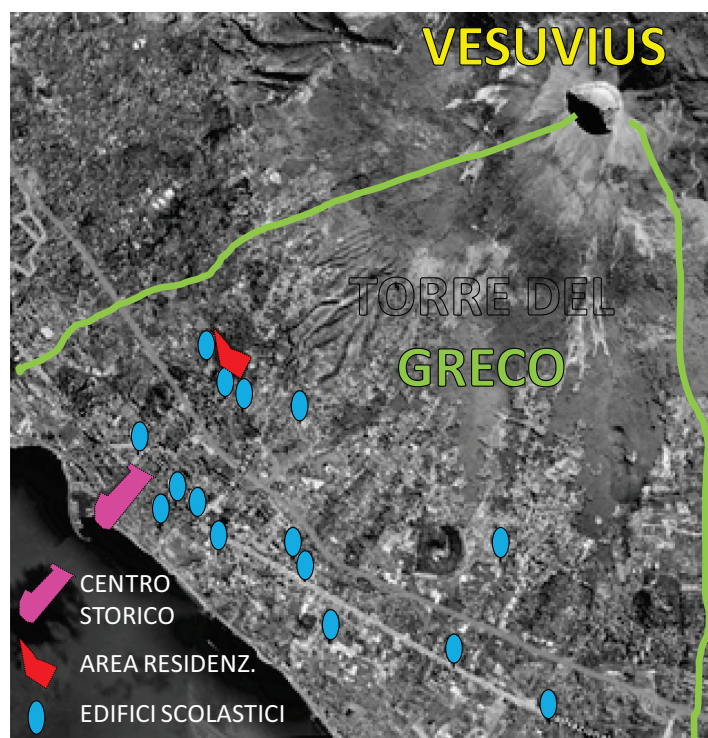
Figura 5. 1. Mappa dell'area vesuviana (www.bing.com).

All'interno del territorio di questa città, sono stati identificati tre campioni di edifici siti in differenti zone urbanizzate, come mostrato nella Figura 5.2. Il primo è costituito da 281 edifici e coincide con una porzione del centro storico della città; il secondo è costituito da 20 edifici e corrisponde ad una zona residenziale decentrata; ed il terzo è costituito da 15 edifici scolastici dislocati sull'intero territorio di Torre del Greco.

I tre campioni sono rappresentativi dell'ambiente urbano vesuviano per quanto riguarda l'esposizione e le tipologie costruttive. Infatti, esse includono costruzioni di differente importanza in termini di livello di sicurezza (costruzioni ordinarie, costruzioni scolastiche e destinate alla pubblica amministrazione) e di tipologie costruttive presenti.

Tabella 5. 1. Comuni dell'area rossa vesuviana (Censimento 2001).

COMUNI DELL'AREA VESUVIANA	ABITANTI [n°]	AREA [km ²]	DENSITA' [n°/km ²]
1. SAN GIORGIO A CREMANO	50 763	4.1	12 351
2. PORTICI	60 218	4.5	13 323
3. ERCOLANO	56 738	19.6	2 889
4. SAN SEBASTIANO AL VESUVIO	9 849	2.6	3 745
5. POLLENA TROCCHIA	13 326	8.1	1 643
6. MASSA DI SOMMA	5 908	3.5	1 703
7. OTTAVIANO	22 670	19.8	1 142
8. SANT'ANASTASIA	28 023	18.7	1 494
9. SOMMA VESUVIANA	33 261	30.7	1 082
10. CERCOLA	18 876	3.7	5 047
11. SAN GIUSEPPE VESUVIANO	24 531	14.1	1 741
12. TERZIGNO	15 870	23.5	675
13. BOSCOREALE	27 618	11.2	2 466
14. POMPEI	25 751	12.4	2 075
15. TORRE DEL GRECO	90 607	30.7	2 955
16. TORRE ANNUNZIATA	40 011	6.1	6 550
17. TRECASE	9 179	6.1	1 495
18. BOSCOTRECASE	10 638	7.5	1 420
Totale	543 837		

**Figura 5. 2.** Localizzazione delle aree esaminate.

La seconda campagna, tenutasi nel gennaio 2009, ha interessato una importante porzione del patrimonio storico- artistico vesuviano: le Ville del Miglio d'Oro. In particolare, dei 122 palazzi sono stati analizzati 9 edifici localizzati nei comuni di Ercolano, Portici, San Giorgio a Cremano e Portici (Figura 5.3).



Figura 5. 3. Ville Vesuviane analizzate.

5.1.2 Torre del Greco e il Vesuvio

La città di Torre del Greco si trova nel mezzo del Golfo di Napoli, e comprende una fascia costiera di 10km ai piedi del Vesuvio. Essa presenta una popolazione di 90.607 abitanti, su di un territorio di 30,7km². In riferimento al numero di abitanti, è la terza città della Campania, dopo Napoli e Salerno.

La vita di Torre del Greco è stata costantemente influenzata dalla storia eruttiva del Vesuvio. Per centinaia di anni, numerose eruzioni hanno provocato seri danni alla città, che, nonostante tutto, è sempre risorta dalle sue ceneri, tanto che il suo stemma è il motto dell'Araba Fenice: "Post fata resurgo" ("Dopo la morte risorgo").

Nell'epoca Romana, grazie alla bellezza dei suoi paesaggi e alla posizione centrale nel Golfo di Napoli, Torre del Greco costituì un sobborgo di Ercolano, caratterizzato dalla presenza di numerose ville patrizie, ancora visibili oggi. Il territorio di Torre del Greco, così come quello di Ercolano, Pompei, Stabia ed Oplonti, fu devastato dall'eruzione esplosiva Pliniana avvenuta nel 79d.C., che ne rimodellò la topografia e ne produsse un ritiro del mare di oltre 500m.

Intorno all'anno 1000, nella zona dove oggi sorge Torre del Greco, si sviluppò un centro urbano con il nome di *Turris Octava*, poiché distante otto

miglia romane (una miglia romana corrisponde a mille passi, intendendo con un passo 1,48m) da Napoli. In seguito, dato che nella regione si coltivava della vite proveniente dalla Grecia, Torre Octava si trasformò in *Torre del Greco*.

Il 15 Giugno 1794, un'eruzione ricoprì il centro storico della città con un deposito di lava con spessore di almeno 10m (Figura 5.4). La chiesa Santa Croce, costruita nel sedicesimo secolo, fu distrutta, anche se il suo campanile, riportato anche sullo stemma della città (Figura 5.5a), sebbene circondato dalla lava riuscì a resistere, ed oggi emerge dalla roccia come mostrato nella Figura 5.5b.

L'8 Dicembre del 1861, una nuova eruzione, accompagnata da continue scosse di terremoto, produsse nuovi danni alla città, che fu ricostruita con grande sacrificio dopo l'eruzione del 1794. La lava si fermò fuori dal centro urbano, ma la città fu comunque soggetta ad alcuni crolli. Arrivarono aiuti economici da molte parti d'Italia, nonostante l'unità nazionale fosse stata appena raggiunta.

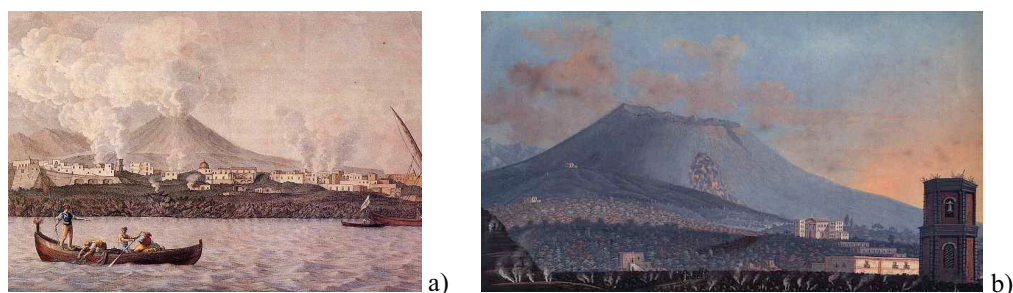


Figura 5. 4. Torre del Greco, eruzione del 1794:

a) Anonimo del 13° secolo; b) Stampa Morgen.

Durante il periodo di tranquillità del Vesuvio, Torre del Greco ha beneficiato della vicinanza al vulcano e del suo straordinario paesaggio. Infatti, a partire dal XVI secolo fino agli inizi del XX, Torre del Greco è stata una località esclusiva. In particolare, durante il regno dei Borboni, tra i secoli XVII e XVIII, dopo la costruzione del Palazzo Reale di Portici (1738), furono costruiti nella zona vesuviana molti edifici importanti, conosciuti come *Ville Vesuviane* o *Ville del Miglio d'Oro*. Una di queste ville, Villa Ferrigni, o Villa delle Ginestre, sita nel comune di Torre del Greco, ha ospitato gli ultimi giorni della vita di Giacomo Leopardi (1798-1837).



Figura 5. 5. a) *Stendardo* di Torre del Greco. b) Il campanile della chiesa di Santa Croce che ha resistito senza danni all'eruzione del 1794. c) Insegna memoriale sul campanile.

Durante la seconda guerra mondiale, la città fu utilizzata come un deposito di munizioni da parte dell'esercito tedesco e, di conseguenza, subì pesanti bombardamenti da parte delle forze alleate. Successivamente, l'industria del turismo ha sofferto molto e con l'aumentare dell'uso dell'automobile, la funicolare, che ha portava i turisti al cratere dalla città, cadde in disuso, eliminando così uno dei motori principali del turismo della città. Inoltre, dal 1950 in poi, lo sviluppo di massa, l'urbanizzazione e l'aumento della popolazione (Figura 5.6) hanno spogliato la città della sua originale atmosfera "rurale", contribuendo a spostare il turismo verso Sorrento e la Costiera Amalfitana.

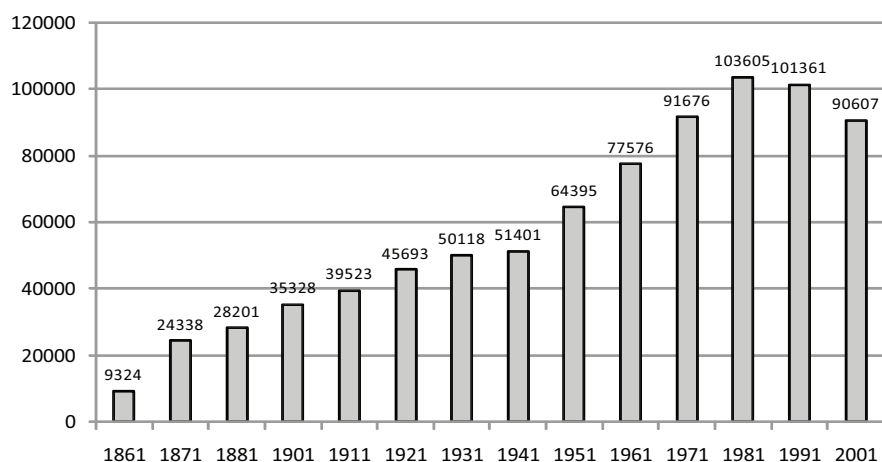


Figura 5. 6. Crescita della Popolazione di Torre del Greco. (Censimento 2001).

5.1.3 *Le Ville del Miglio d'Oro*

Le *Ville del Miglio d'Oro*, o *Ville Vesuviane*, costituiscono le 121 residenze storiche nate nel Settecento lungo l'ex strada Regia delle Calabrie, che collegava Napoli con Reggio Calabria, nei comuni di San Giovanni a Teduccio, Barra, San Giorgio a Cremano, Portici, Ercolano e Torre del Greco (Figura 5.7).



Figura 5. 7. Il Miglio d'Oro.

Già nelle età greca e romana, Ercolano ed Oplonti (attuale Torre Annunziata) furono centri di grande rilievo, ma fu il Settecento il secolo di massimo splendore per l'area vesuviana, nonostante le continue eruzioni, la più terribile delle quali risale al 1794.

Era il 1738 quando la regina Maria Amalia di Sassonia sposò Carlo di Borbone, da quattro anni sul trono di Napoli, e indusse suo marito a scegliere Portici per la costruzione di una villa reale e per dare inizio agli scavi di Ercolano, ai quali seguirono, dieci anni più tardi, quelli di Pompei. Da quel momento, tutti i nobili napoletani decisero di seguire l'esempio lanciato dalla corte borbonica, facendo costruire lungo la zona costiera ai piedi del Vesuvio le loro ville per il soggiorno estivo. Lungo quest'asse ideale, che collega il vulcano al mare, giustamente ribattezzato "Miglio d'oro", prese vita un patrimonio storico e architettonico senza precedenti, espressione di uno dei periodi più fiorenti vissuti dalla società napoletana. Inizia così una nuova era

che vede aumentare il numero delle ville restaurate o costruite ex novo da autentici talenti, che vanno da Gioffredo a Sanfelice, da Vaccaro a Fuga fino a Vanvitelli. Questo periodo costituisce l'ultimo grande momento di rigoglio della stagione del barocco e del rococò europeo.

Nell'elenco ufficiale, le Ville Vesuviane sono 122 e non 121, perché è considerata tale anche *Villa delle Ginestre*, residenza di Giacomo Leopardi, che, pur non essendo una villa settecentesca (è infatti del 1800), presenta caratteristiche simili alle Residenze del Miglio d'Oro.

5.2. CENTRO STORICO DI TORRE DEL GRECO

La porzione del centro storico rilevata durante la campagna del gennaio 2008 è illustrata in Figura 5.8 (De Gregorio et al., 2010b). Essa comprende 281 edifici e si trova a 6km dal cratere del Vesuvio. Quest'area si estende su una superficie di circa 0,15km², a partire dalla zona commerciale della città (via Roma) a quella portuale.



Figura 5. 8. Porzione del centro storico di Torre del Greco.

Oggi, l'area in esame è principalmente a destinazione residenziale, anche se numerose attività commerciali si trovano al piano terra degli edifici, specie nella parte nord. La zona è divisa in due parti dalla linea ferroviaria Napoli-Salerno, per cui è possibile individuare le due macro-zone A e B indicate in Figura 5.8. La prima (Figura 5.9), più a nord, è caratterizzata da edifici in buono stato di conservazione, mentre la seconda (Figura 5.10), a sud, è caratterizzata da costruzioni in cattivo stato di manutenzione, in particolare con intonaco staccato e danni alle architravi.



Figura 5. 9. Zona “A” del centro storico di Torre del Greco.



Figura 5. 10. Zona “B” del centro storico di Torre del Greco.

Nell’area investigata, si trovano due edifici importanti: il campanile di Santa Croce e il *Palazzo di Città*.

Il campanile barocco di Santa Croce (Figura 5.5b), costruito nel XVI secolo e raffigurato nello stemma della città (Figura 5.5a), è il simbolo di Torre del Greco. Anche se circondato dalla lava dell’eruzione del 1794, ha resistito, mentre l’adiacente chiesa di Santa Croce è andata completamente distrutta. Oggi, la torre emerge dalla roccia, con solo i due livelli superiori visibili.

Il *Palazzo di Città* (Figure 5.11) è un edificio con struttura in muratura di tufo e copertura in legno a due falde (Florìo et al., 2009), che nacque come l’antico castello del primo nucleo urbano di Torre del Greco. Il palazzo resistette alla eruzione vulcanica del 1794, grazie alla sua posizione su di un’altura (28m sopra il livello del mare). Per tale motivo è stato scelto come

edificio “strategico” da utilizzare per la gestione delle emergenze ed è, oggi, sede degli uffici comunali di Torre del Greco.



Figura 5. 11. Palazzo di città, sede del municipio di Torre del Greco.

I dati raccolti durante l'attività di indagine del centro storico, sintetizzati nella Tabella 5.2, indicano la presenza di edifici raramente isolati, spesso associati in aggregati a sviluppo lineare o con cortile interno.

Tabella 5. 2. Principali parametri rilevati nell'attività di rilievo del centro storico di Torre del Greco.

STRUTTURA VERTICALE	SPESSORE MURATURA	STRUTTURA ORIZZONTALE	STRUTTURA COPERTURA	GEOMETRIA COPERTURA	TAMPONATURA	% APERTURE
51%	62%	57%	64%	84%	55%	1%
Mur. in tufo	80-100cm	Solai in ferro	Cop. in ferro	Piane	Mattoni di tufo	<10%
34%	32%	25%	18%	1%	4%	5%
Mur. a sacco	50-70cm	Volte	Cop. in c.a.	A falde	Mattoni pieni	10-25%
5%	6%	18%	14%	1%	41%	89%
Mur. sbazzata	30-40cm	Solai latero c.	Volte	Falda singola	Mattoni forati	25-50%
10%			4%	14%		5%
C.A.			Cop. in legno	Volte		>50%

Le costruzioni risultano prevalentemente irregolari in pianta e in elevazione e, come indicato in Tabella 5.2, le principali strutture verticali sono costituite da muratura a sacco (34%) o in muratura di tufo (51%), precedente il 1920. Solo il 10% delle strutture verticali sono costituite da telai mono-direzionali in c.a., localizzati per lo più nella zona B e costruiti tra il 1960 e il 1970 (Figura 5.12).

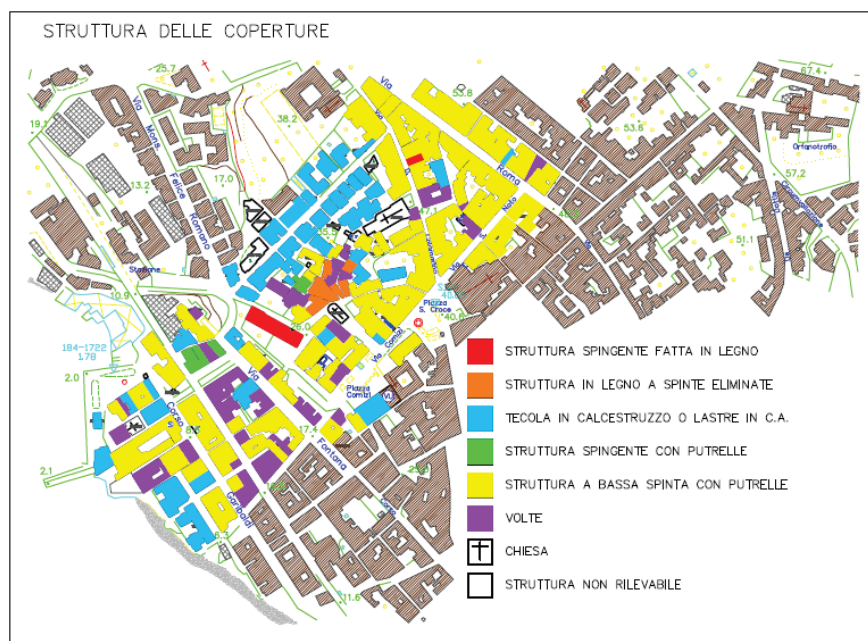


Figura 5. 13. Distribuzione delle strutture di copertura nel centro storico di Torre del Greco.

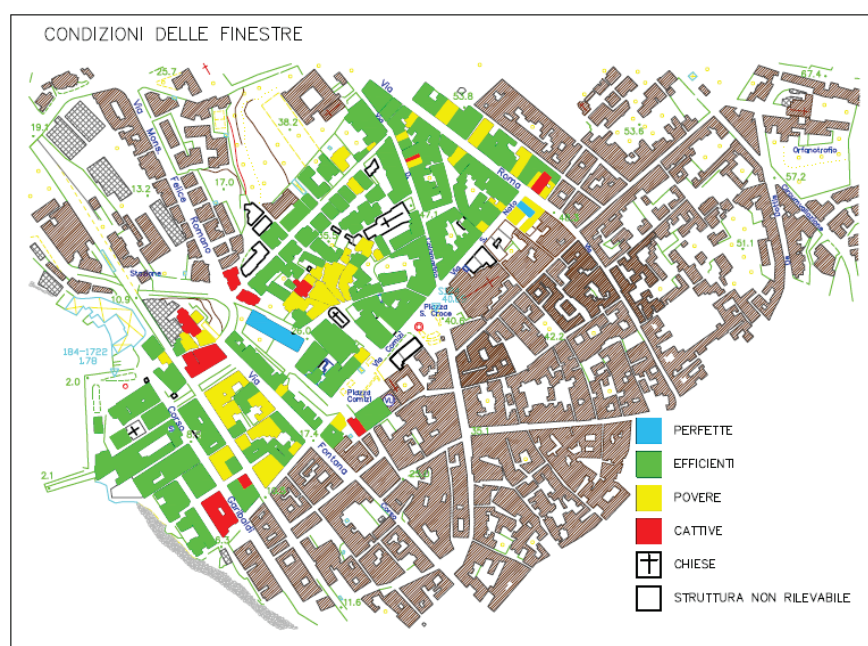


Figura 5. 14. Condizioni delle aperture nel centro storico di Torre del Greco.

5.3. AREA RESIDENZIALE DI TORRE DEL GRECO

L'area residenziale esaminata nel gennaio 2008 (Figura 5.15) è costituita da 20 edifici e si trova di una zona decentrata di Torre del Greco, nelle prossimità di via Montedoro. A causa della breve distanza che la separa dal cratere del Vesuvio, soli 4km, quest'area è esposta altissimo rischio vulcanico.



Figura 5. 15. Area residenziale di Torre del Greco.

I dati raccolti durante l'attività di indagine dell'area (De Gregorio et al., 2010b), sintetizzati nella Tabella 5.3, indicano la presenza edifici isolati o associati in aggregati a sviluppo lineare.

Circa la metà delle strutture verticali (45%) sono costituite da muratura a sacco o in tufo precedente il 1919, mentre la restante parte è costituita da telai monodirezionali in cemento armato (45%), costruiti negli anni Sessanta e strutture miste muratura-c.a. (10%).

Le strutture orizzontali sono prevalentemente costituite da solai latero-cementizi (75%), così come coperture che presentano geometria piana nell'80% dei casi.

Le aperture e le loro protezioni sono realizzate in legno o alluminio e sono in efficienti condizioni. In un numero prevalente di edifici (65%), queste coprono una percentuale compresa tra il 25 e il 50% delle facciate degli edifici.

Le tamponature sono costituiti sempre da mattoni forati con spessore di 30cm.

Come si evince da alcune immagini riportate in Figura 5.16, ad un esame visivo, le costruzioni risultano in buono stato di manutenzione. Si registrano solo sporadici casi di distacco dell'intonaco.

Tabella 5. 3. Principali parametri rilevati nell'attività di rilievo dell'area residenziale di Torre del Greco.

STRUTTURA VERTICALE	SPESSORE MURATURA	STRUTTURA ORIZZONTALE	STRUTTURA COPERTURA	GEOMETRIA COPERTURA	TAMPONATURA	% APERTURE
40% Mur. in tufo	40% 40cm	20% Solai in ferro	20% Cop. in ferro	80% Piane	100% Mattoni forati	5% <10%
5% Mur. a sacco	20% 50cm	5% Volte	75% Cop. in c.a.	5% A falde		30% 10-25%
10% Strut. mista	40% 60cm	75% Solai latero c.	5% Volte	10% Falda singola		65% 25-50%
45% C.A.				5% Volte		0% >50%



Figura 5. 16. Edifici dell'area residenziale di Torre del Greco.

5.4. COMPLESSI SCOLASTICI DI TORRE DEL GRECO

I complessi scolastici esaminati sono 15 (Figure 5.17 e 5.18) e sono dislocati sull'intero territorio del comune di Torre del Greco. Si tratta di scuole pubbliche: 5 destinate all'istruzione media primaria (Romano, Angioletti, Morelli, D'Assisi, Leopardi) e 10 all'istruzione elementare (Orsi, S. Vito- Giampietro, Chiazzolelle- Camaldoli, Leoardi- Campanariello, Sauro, Mazza, Don Bosco, Don Milani, Cappuccini, Scappi- S. Elena).

I dati raccolti durante l'attività di indagine dell'area (Florio et al., 2010), sono sintetizzati nelle Tabelle 5.4 e 5.5.

Le principali tipologie delle strutture verticali sono in muratura di tufo (38%), o in cemento armato con telai monodirezionali (48%), anche se non mancano esempi di strutture miste muratura- c.a. (14%).

Le strutture orizzontali sono prevalentemente costituite da solai latero-cementizi (94%), così come coperture (97%) che presentano geometria piana nel 97% dei casi.

Le aperture sono in alluminio, in efficienti condizioni, ma nella totalità dei casi risultano assenti le protezioni. Circa la metà degli edifici (53%) presenta una percentuale di aperture in facciata compresa tra il 25 e il 50%, ma esiste una porzione di strutture non trascurabile (12%) che presenta una percentuale di aperture superiore al 50%.

Le tamponature sono costituite per metà (48%) da blocchi di tufo e per metà (52%).

Tabella 5. 4. Informazioni relative alle costruzioni scolastiche considerate.

SCUOLE	ANNI	TIPOLOGIA	COPERTURA	% APERTURE	PROTEZIONI
Orsi	'46-60	Muratura	Piana	10-25	Assente
S. Vito-Giampietro	'46-60	Muratura	Piana	10-25	Assente
Chiazzolelle-Camaldoli	'46-60	Muratura	Piana	10-25	Assente
Leopardi-Campanariello	'19-45	Muratura	Piana	25-50	Assente
Sauro	'19-45	Muratura	Piana	10-25	Assente
Mazza	'19-45	Muratura	Piana	25-50	Assente
Don Bosco	'61-71	Muratura	Piana	25-50	Assente
B.V.Romano	'61-71	C.A.	Piana	>50	Assente
Angioletti	'72-81	C.A.	Piana	25-50	Assente
Morelli	'92-01	C.A.	Piana	25-50	Assente
D'Assisi	'82-91	C.A.	Piana	>50	Assente
Leopardi	'82-91	C.A.	Piana	25-50	Assente
Don Milani	'92-01	Mista	Piana	25-50	Assente
Cappuccini	'72-81	Muratura	Piana	25-50	Assente
Scappi-S.Elena	'82-91	Muratura	Piana	10-25	Assente

Tabella 5. 5. Principali parametri rilevati nell'attività di rilievo
dei complessi scolastici di Torre del Greco.

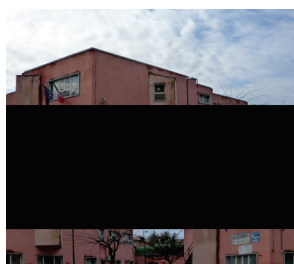
STRUTTURA VERTICALE	SPESSORE MURATURA	STRUTTURA ORIZZONTALE	STRUTTURA COPERTURA	GEOMETRIA COPERTURA	TAMPONATURA	% APERTURE
38% Mur. in tufo	29% 30-40cm	3% Solai in ferro	3% Cop. in ferro	97% Piane	52% Mattoni forati	0% <10%
14% Strutt. miste	64% 50-70cm	3% Volte	97% Cop. in c.a.			35% 10-25%
	7% 80-100cm	94% Solai latero c.		3% Falda singola	48% Mattoni di tufo	53% 25-50%
48% C.A.						12% >50%



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 5. 17. Scuole medie esaminate: a) scuola m. Romano; b) scuola m. Angioletti; c) scuola m. Morelli; d) scuola m. D'assisi; e) scuola m. Leopardi.

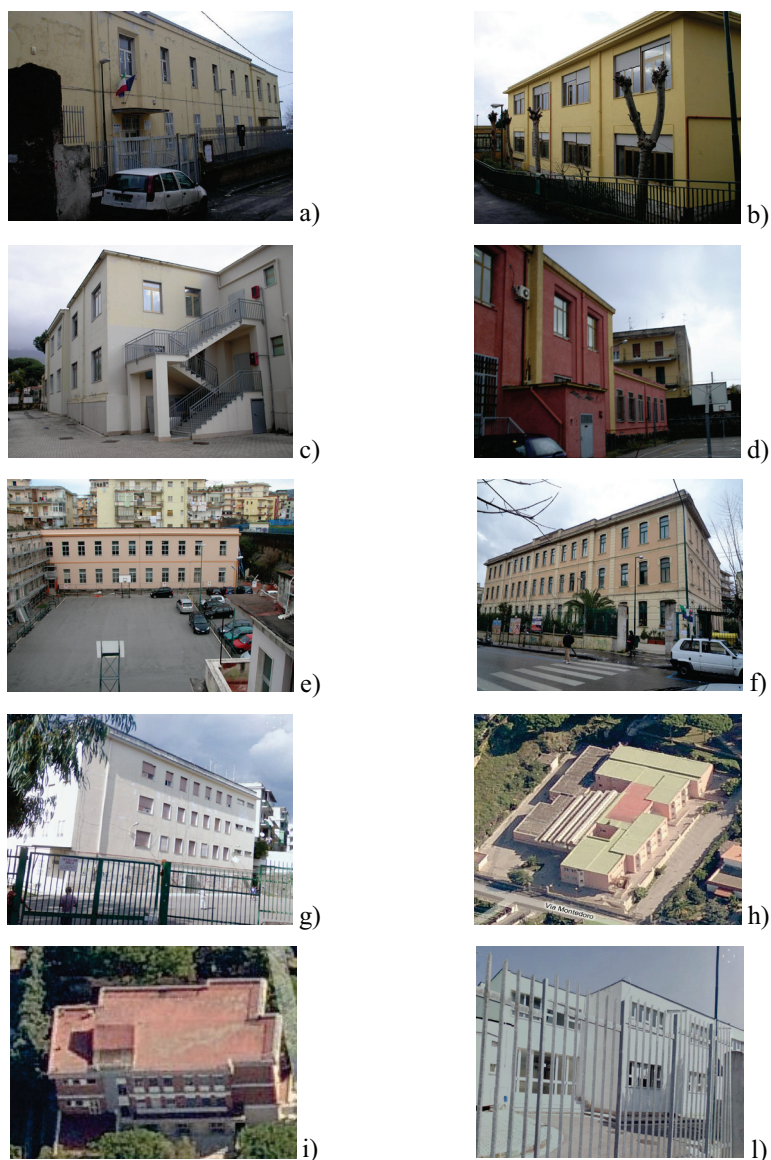


Figura 5. 18. Scuole elementari esaminate: a) scuola el. Orsi; b) scuola el. S. Vito; c) scuola el. Chiazzolelle; d) scuola el. Leopardi; e) scuola el. Sauro; f) scuola el. Mazza; g) scuola el. Don bosco; h) scuola el. Don Milani; i) scuola el. Scappi Cappuccini; l) scuola el. Scappi S. Elena.

5.5. VILLE VESUVIANE

Tra le 122 Ville del Miglio d'Oro, durante la campagna di rilievi del gennaio 2009, sono state analizzate le seguenti 9 Ville:

1. Villa Campolieto, Ercolano (Figura 5.19a);
2. Villa Ruggiero, Ercolano (Figura 5.19b);
3. Parco sul mare di Villa Favorita, Ercolano (Figura 5.19c);
4. Villa Aprile, Ercolano (Figura 5.19d);
5. Villa delle Ginestre, Torre del Greco (Figura 5.19e);
6. Villa Macrina, Torre del Greco (Figura 5.19f);
7. Villa Bruno, San Giorgio a Cremano (Figura 5.19g);
8. Villa Vannucchi, San Giorgio a Cremano (Figura 5.19h);
9. Villa Mascolo, Portici (Figura 5.19i);

Da un punto di vista architettonico le Ville Vesuviane presentano le caratteristiche tipiche degli stili Barocco e Roccocò: gusto scenografico, uso sapiente degli effetti prospettici con le architetture su fondali costituiti dal Vesuvio e dal mare, mescolanza spregiudicata degli ordini architettonici.

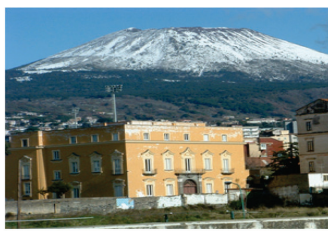
Uno degli aspetti costanti delle Ville del Miglio d'Oro è la *duplicità* della configurazione sul fronte e sul retro, ossia l'adozione di un prospetto compatto sulla strada, allineato al filo delle fabbriche circostanti, quasi che si trattasse di un edificio urbano, di una dimora di città o di un palazzo (Figura 5.20a); e al contrario, l'articolazione di un prospetto del tutto diverso, assai più movimentato alle spalle (Figura 5.20b), sia nel caso in cui questo secondo prospetto sia articolato verso il mare, sia nel caso che esso invece sia rivolto verso il Vesuvio o la campagna. Vi è quindi una singolare antitesi tra il tema 'urbano' esterno ed il vero carattere di villa extraurbana che si coglie all'interno, una volta superato l'androne, chiuso dal pesante portone spesso sovrastato da una rosa lignea intagliata.

La disposizione planimetrica delle Ville, quasi sempre simmetrica, si rivela poi fondata su di un'altra costante: il *percorso assiale*, coperto/scoperto, basato sulla sequenza: portale- atrio- cortile- esedra- giardino, con un asse ottico principale sul quale si innestano altri episodi trasversali o diagonali. Un esempio è offerto dalla planimetria di Villa Campolieto (Figura 5.21a).

Particolare rilievo, come del resto sempre nell'architettura napoletana coeva, assumono le *scale*, che vengono di solito innestate sull'atrio, il più



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)

Figura 5. 19. Ville analizzate: a) Villa Campolieto, Ercolano; b) Villa Ruggiero, Ercolano; c) Parco sul mare di Villa Favorita, Ercolano; d) Villa Aprile, Ercolano; e) Villa delle Ginestre, Torre del Greco; f) Villa Macrina, Torre del Greco; g) Villa Bruno, San Giorgio a Cremano; h) Villa Vannucchi, San Giorgio a Cremano; i) Villa Mascolo, Portici.

delle volte simmetricamente (Figura 5.21b), con evidente ripresa del tema dell'edilizia urbana della capitale borbonica, dove la scala aperta con archi rampanti sul cortile costituisce tratto costante risolto con singolare varietà di soluzioni particolari sia sotto il profilo morfologico sia sotto quello dimensionale.



Figura 5. 20. Villa Vanucchi: a) prospetto fronte strada; b) prospetto posteriore.

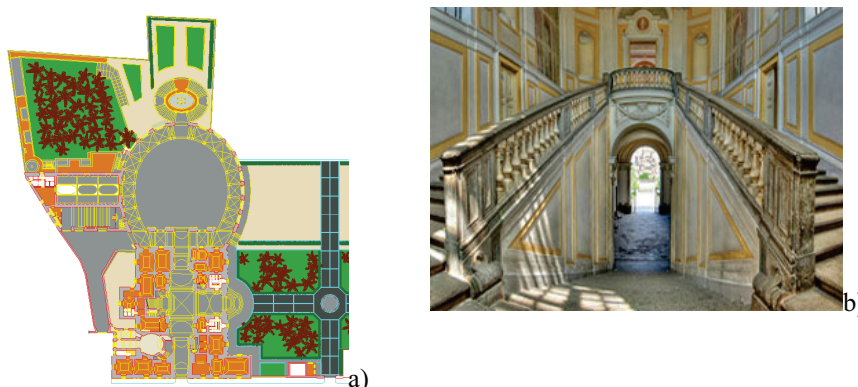


Figura 5. 21. Villa Campolieto: a) planimetria con il percorso assiale portale- atrio- cortile- esedra- giardino; b) vista della scala.

L'impiego sapiente degli effetti ottici, legato alle esperienze della tecnica scenografica dell'età barocca, alle ben note tematiche dell'effimero, in cui tutti gli operatori del tempo erano particolarmente versati, si completa attraverso un uso a dir poco spregiudicato degli ordini architettonici codificati dal Vignola, intesi qui in senso puramente decorativo più che metrico-

proporzionale, uso perfettamente consentito dal clima architettonico del Roccocò napoletano. Così, frequenti sono le prospettive che si aprono verso gli elementi fondamentali del paesaggio (Vesuvio da un lato, golfo di Napoli dall'altro), ovvero l'impiego di singoli squarci verso 'quadri naturali' suggeriti dalla bellezza del sito.

Passando all'analisi degli spazi interni, si rileva una certa flessibilità e libertà di innesti spaziali, cosicché alle soluzioni per così dire ufficiali si accompagnano soluzioni intimistiche per gli spazi destinati alla vita privata.

In conclusione, si può affermare che dal ricco patrimonio edilizio vesuviano del Settecento emerge una maggiore varietà e soprattutto libertà compositiva rispetto alle coeve fabbriche urbane, il più delle volte condizionate da più rigide geometrie o dal tracciato viario della città.

Notevole è, quindi, l'apporto delle Ville Vesuviane alla storia dell'architettura napoletana del Settecento, sia per la ricca esemplificazione di soluzioni spaziali, sia per le felici condizioni ambientali, occasione unica ed irripetibile per liberare una ricchezza di risorse inventive altrove mortificate. Agli elementi rilevati come pecuriali, dell'assialità e pluriassialità, dei percorsi alternati coperti/scoperti, si accompagna l'*ornamentazione di stucchi, affreschi e mosaici* (Figura 5.22).

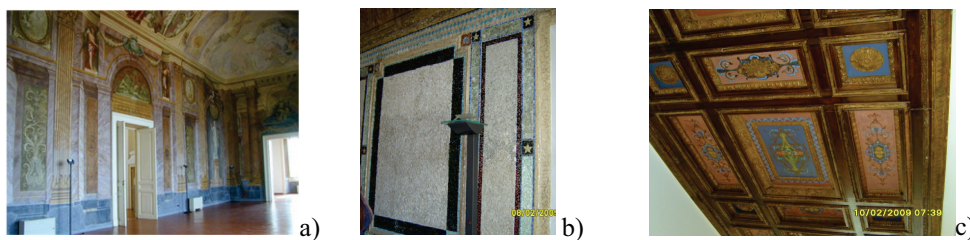


Figura 5. 22. Esempi di ornamentazioni delle Ville Vesuviane; a) Villa Campolieto, affreschi; b) Parco sul mare di Villa Favorita, mosaici; c) Villa Macrina, soffitto a cassettoni.

I dati raccolti durante l'attività di indagine dell'area (Alterio et al., 2010), sono sintetizzati nella Tabella 5.6.

Le strutture verticali risultano sempre essere costituite di muratura a sacco.

Le strutture orizzontali sono prevalentemente costituite da solai in ferro (67%), ma non mancano esempi di solai in legno (20%) e volte (13%).

Le coperture risultano piane (40%) o a falda multipla con leggera inclinazione (40%), con struttura in ferro (40%), in legno (40%) o a volte (20%).

Le aperture sono in legno, in efficienti condizioni, ma nella totalità dei casi risultano assenti le protezioni. La maggior parte degli edifici (89%) presenta una percentuale di aperture in facciata compresa tra il 25 e il 50%.

Accanto a questi parametri, per le Ville Vesuviane sono stati rilevati anche la presenza di alcuni elementi di vulnerabilità sismica: assenza di connessioni tra pareti ortogonali e/o catene o cordoli ai vari livelli; muratura di scarsa qualità, o area resistente ridotta lungo una o più direzioni; presenza di un piano sfalsato; eccessiva distanza tra muri e controvento; presenza di aperture poste in prossimità della linea di colmo della copertura.

Per quanto concerne i beni artistici di pregio, è stata evidenziata la presenza di: affreschi (88%), libri (66%), statue (55%), quadri (44%), arredi (33%); mosaici (22%) e stucchi (18%).

Tabella 5. 6. Principali parametri rilevati nell'attività di rilievo dei complessi scolastici di Torre del Greco.

STRUTTURA VERTICALE	SPESSORE MURATURA	STRUTTURA ORIZZONTALE	STRUTTURA COPERTURA	GEOMETRIA COPERTURA	TAMPONATURA	% APERTURE
100%	11%	67%	40%	40%	100%	0%
Mur. a sacco	30-40cm	Solai in ferro	Cop. in ferro	Piana	Mur. a sacco	<10%
	44%	20%	20%	40%		11%
	50-70cm	Legno	Volte	Falda multipla		10-25%
	45%	13%	40%	20%		89%
	80-100cm	Volte	Legno	Volte		25-50%
MOSAICI	AFFRESCHI	QUADRI	STATUE	LIBRI	STUCCHI	ARREDI
22%	88%	44%	55%	66%	18%	33%

Capitolo 6

Analisi delle tipologie costruttive vesuviane tipiche

6.1. LE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE VESUVIANE

Dall'analisi dei risultati ottenuti attraverso i rilievi illustrati nel cap.5, si evince la presenza delle tipologie costruttive di seguito descritte.

Le strutture verticali sono costituite da muratura con blocchi di tufo squadrati o muratura a sacco con scheggioni di lava (realizzate tra la fine dell'800 ed il '900 o nel secondo dopoguerra tra gli anni '45 e '55) e da telai in c.a. prevalentemente monodirezionali (realizzati tra gli anni '50 e gli anni '70).

In genere, per gli edifici in muratura, le scale sono in muratura, mentre per quelli in c.a. presentano soletta rampante.

Gli orizzontamenti, comprese le coperture, sono prevalentemente in ferro e tavelloni o latero- cementizi, anche se sono presenti esempi di solai in legno e volte.

La geometria delle coperture è quasi sempre piana o con falda multipla con scarsa pendenza.

Le aperture risultano costituite da infissi in legno o alluminio, mediamente, in discrete condizioni, con una percentuale di bucature in facciata compresa tra il 25 e il 50%. Si registrano numerosi casi di assenza di protezione a porte e finestre.

Le tamponature sono sostanzialmente costituite da mattoni in blocchi di tufo di dimensione media compresa tra i 60 e gli 80cm o da mattoni forati con uno spessore medio di 30cm.

Nel seguito, si illustrano i risultati di analisi strutturali che mirano ad esaminare il comportamento di alcuni casi studio presenti nelle aree investigate, nei riguardi delle azioni vulcaniche. L'attenzione è focalizzata su telai in c.a. destinati ad edilizia ordinaria e scolastica, a specifiche strutture murarie, agli orizzontamenti tipici vesuviani ed agli elementi di chiusura (tamponature e aperture).

6.2. TELAI IN C.A.

6.2.1 Edilizia ordinaria

Caso studio

In riferimento alle strutture in c.a., è stato preso a riferimento un edificio (Figura 6.1) localizzato nell'area residenziale di Torre del Greco di Figura 5.2, a 4km dal cratere del Vesuvio.



Figura 6. 1. Vista area dell'edificio in esame (www.bing.com).

L'edificio è stato progettato negli anni '70 per resistere ai soli carichi gravitazionali, in accordo con la normativa tecnica dell'epoca (Legge 1086, 1971).

La struttura, i cui disegni architettonici e strutturali sono indicati in Figura 6.2, risulta regolare in pianta ed in elevazione. Presenta due piani, alti 3,50 e 3,00m e, come le tipiche strutture in c.a. realizzate in Campania prima del 1980, è articolato in una serie di telai longitudinali (X) collegati da telai trasversali (Y) solo lungo il perimetro.

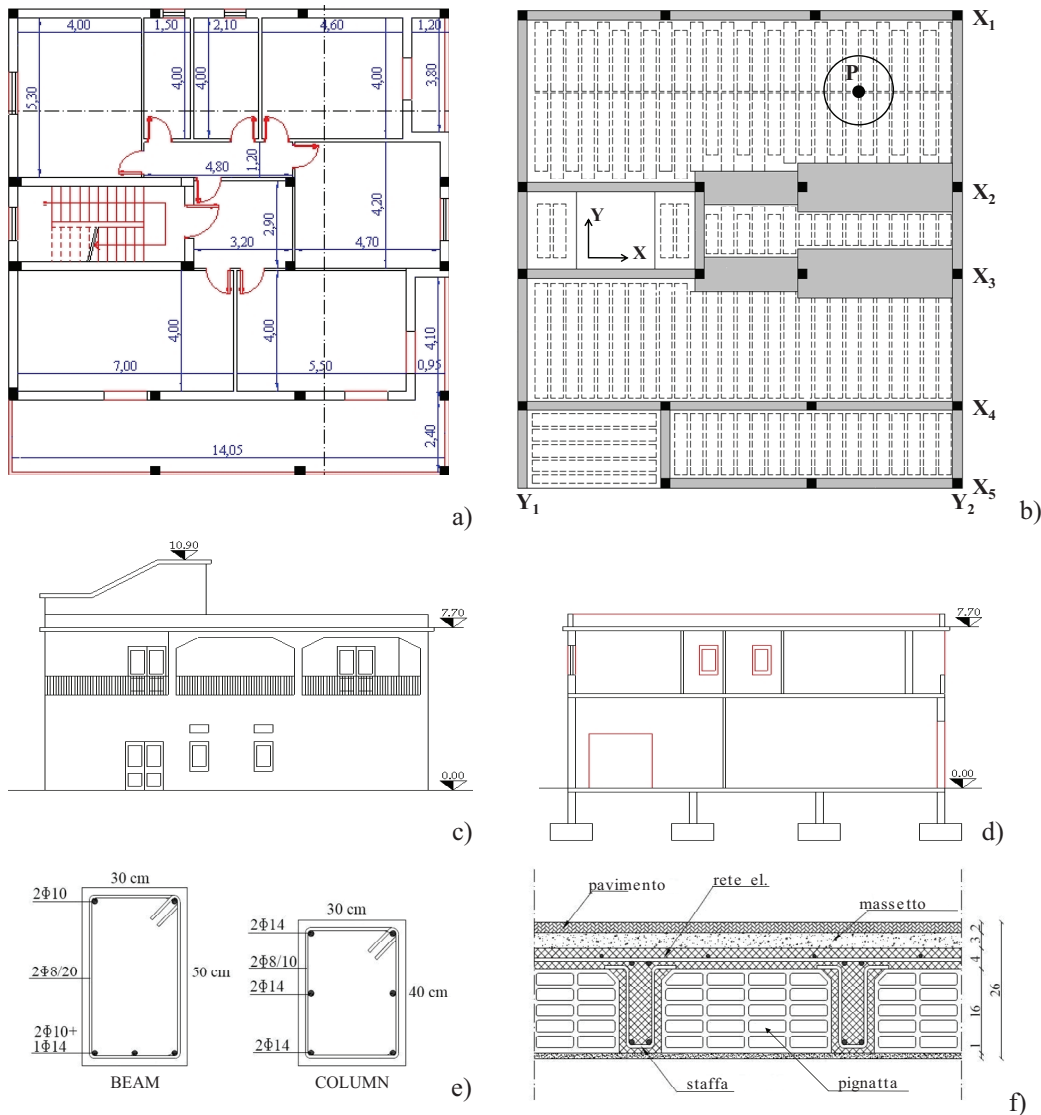


Figura 6. 2. Caso studio: a) pianta primo piano; b)carpenteria del primo piano; c) prospetto sud; d)sezione E-W; e) sezioni travi e colonne; f) sezione solaio.

Come si evince dalla pianta carpenteria (Figura 6.2b) le travi hanno sezione trasversale differente all'interno dello stesso impalcato, essendo queste sia di tipo emergente (30×50 e 30×60) sia di tipo a spessore (con base pari a 110 e 160 cm). Un'ulteriore particolarità strutturale si ha in corrispondenza dell'ultimo telaio longitudinale X₅, il quale è composto da travi che, per una lunghezza di 80cm a partire dagli appoggi, presentano altezza variabile da 50 a 80cm (Figura 6.2c). Tutti i pilastri, dimensionati tenendo conto del solo sforzo assiale, hanno una sezione di 40×30cm al piano terra e 30×30cm al primo piano. Il sistema fondale è posto ad una profondità di 2,50m ed è costituito da plinti quadrati isolati aventi una base di 1,60×1,60m ed un'altezza di 80cm.

I materiali strutturali utilizzati sono: calcestruzzo C20/25 e barre di acciaio lisce FeB32k. La riduzione delle proprietà meccaniche di questi materiali (resistenza f e modulo di Young E), per effetto delle alte temperature dei prodotti vulcanici, sono state stimate in funzione delle disposizioni dell'Eurocodice 2, Parte 1.2 (2005), come indicato nella Tabella 6.1.

Tabella 6. 1. Proprietà meccaniche dei materiali in funzione della temperatura
(Eurocodice 2, Parte 1.2, 2005).

	Calcestruzzo C20/25		Acciaio FeB32k	
T	f_c	E_c	f_s	E_s
[°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
20	20.0	29962	190.0	210000
100	20.0	29962	190.0	210000
200	18.7	261 00	171.0	182700
300	17.3	22505	152.0	151200
400	16.0	19176	133.0	117600
600	9.6	9588	41.8	74760
800	3.2	0	20.3	31920
1000	0.0	0	3.8	4200

Il modello agli elementi finiti dell'edificio, illustrato in Figura 6.3, è stato implementato mediante il programma SAP2000, V.11.

Travi e colonne sono state modellate come elementi monodimensionali (frame), mentre il comportamento da piano infinitamente rigido, prodotto dalla soletta in c.a., è modellata attraverso il vincolo ad hoc sui nodi

(*diaphragm*). Allo scopo di analizzare l'effetto dei depositi piroclastici da caduta, il solaio di copertura è stato modellato attraverso elementi *shell*.

Nelle estremità di travi e pilastri e nella mezzera delle travi, sono state assegnate delle cerniere plastiche a comportamento elastico-perfettamente plastico, in accordo la le normativa sismica italiana (OPCM 3431, 2005). Per le colonne, la combinazione carico assiale- momento flettente è stata considerata.

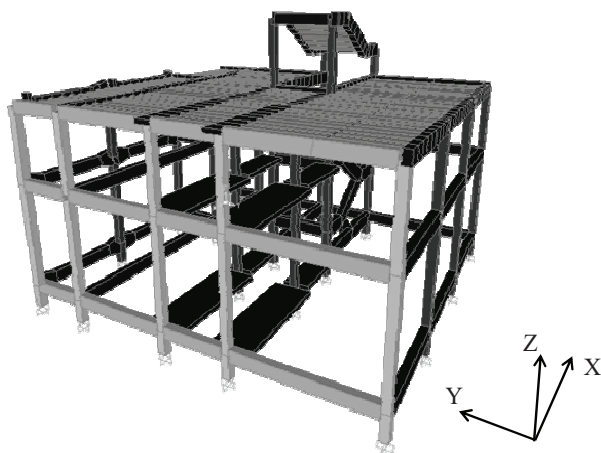


Figura 6.3. Modello agli elementi finiti della struttura in esame.

L'edificio, vista la sua posizione, è esposto sia ad eventi sismici tettonici che ad azioni vulcaniche. Nello specifico, le analisi condotte si riferiscono a tre eventi eccezionali (Mazzolani et al., 2009b; Mazzolani et al., 2010a):

1. terremoto tettonico;
2. terremoto vulcanico;
3. depositi da caduta in copertura.

In particolare, il sisma tettonico assunto è quello dell'Irpinia (Avellino, Campania, Italia) verificatosi il 23 novembre 1980, che, con una magnitudo di 6,9 e una distanza ipocentrale pari a 20km dal livello medio del mare, distrusse 70 aree edificate, danneggiò più di 200 città e provocò oltre 3000 vittime e 1000 feriti. I sismogrammi di riferimento (Figura 6.4) sono quelli registrati nella stazione accelerometrica di Torre del Greco. Essi presentano accelerazioni massime di 0,06g in direzione NS, 0,04 g in direzione EW

radiale (con frequenze prevalenti di 2,5 e 3Hz, rispettivamente) e 0,035g in direzione verticale.

Il sisma vulcanico di riferimento è quello verificatosi il 9 ottobre 1999, l'evento più notevole a partire dall'ultima eruzione vesuviana (1944), con una magnitudo di 3,6 e una distanza ipocentrale pari a 3,8km dal livello medio del mare. I sismogrammi assunti nelle analisi (Figura 6.5) sono quelli registrati presso la stazione BKN di Torre del Greco della rete sismica del Vesuvio. Essi presentano accelerazioni massime di: 0.012g in direzione trasversale, 0.010g in direzione radiale (con frequenze prevalenti di 8 e 10 Hz, rispettivamente) e 0.007g in direzione verticale.

La differenza sostanziale tra i due terremoti considerati è legata alla frequenza di picco dell'accelerazione massima. Come illustrato in Figura 6.6, i picchi degli spettri di risposta dei sismi tettonico e vulcanico, pari a 0.37g e 0.05g, rispettivamente, si verificano in corrispondenza di periodi T pari a 0.40s e 0.14s, rispettivamente.

Secondo le Nuove Norme Tecniche italiane (NTC, 2008), il periodo di fondamentale T_1 di una struttura può essere calcolata attraverso la seguente relazione:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4} \quad (6.1)$$

dove: C_1 è pari a 0,05 e 0,075 per edifici in muratura e in c.a., rispettivamente, e H è l'altezza totale della costruzione.

Dunque, per edifici in muratura il periodo T_1 è compreso tra 0,11 e 0.28s per altezze che variano tra i 3 e i 10m, mentre gli edifici in c.a. T_1 è compreso tra 0,29 e 0.6s per altezze che variano tra i 6 e i 16m. Ciò implica, almeno con riferimento ai sismogrammi in esame, una maggiore sensibilità degli edifici in muratura nei riguardi dei terremoti vulcanici, e degli edifici in c.a. nei riguardi di quelli tettonici.

Con riferimento ai depositi piroclastici da caduta, in accordo con quanto indicato nel par.3.3.2, lo schema scelto per l'azione è quello di un carico gravitazionale uniformemente distribuito in copertura, con densità pari a 8, 12, 16 e 20kgm⁻³ e con temperature dei clasti comprese tra 200 e 400°C.

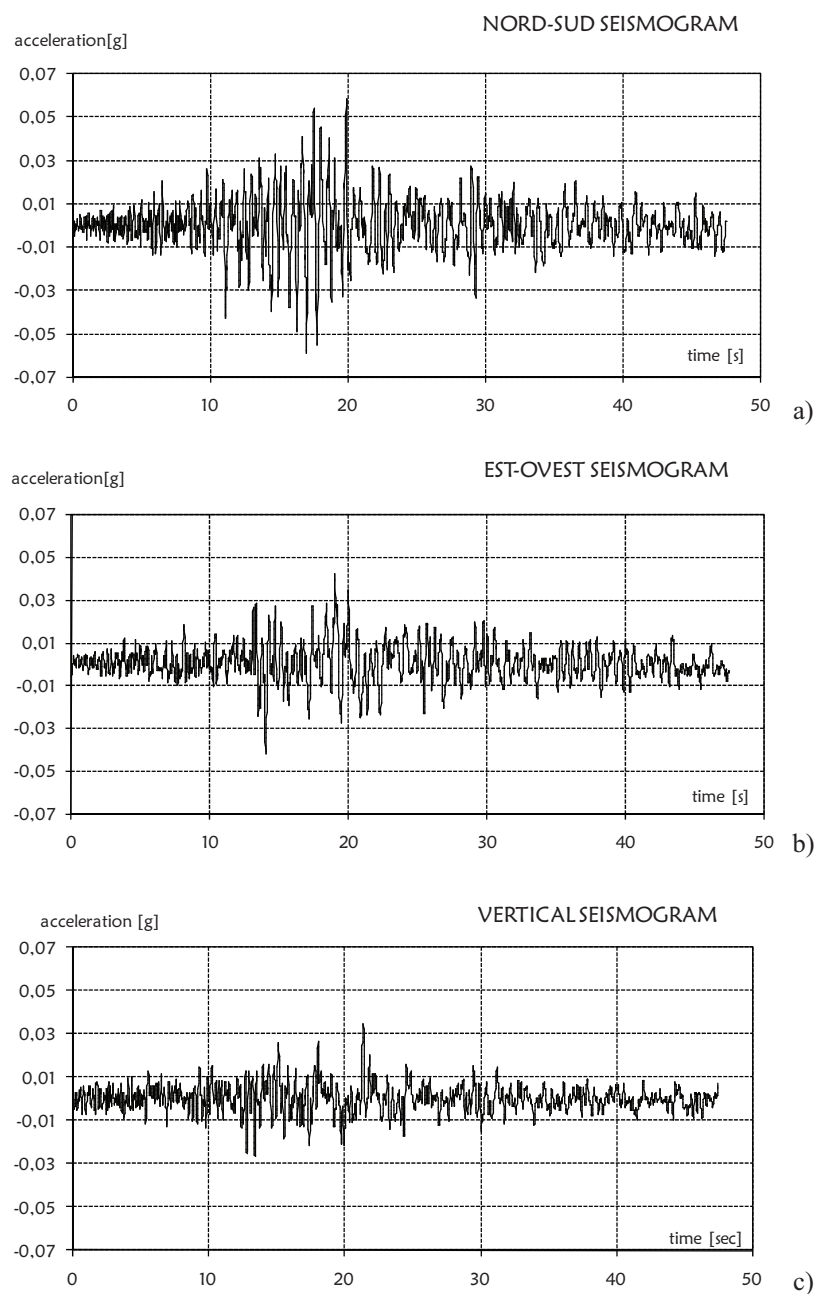


Figura 6. 4. Terremoto tettonico dell'Irpinia del 1980. Sismogrammi registrati nella stazione accelerometrica di Torre del Greco: a) direzione N-S; b) direzione E-W; c) direzione verticale.

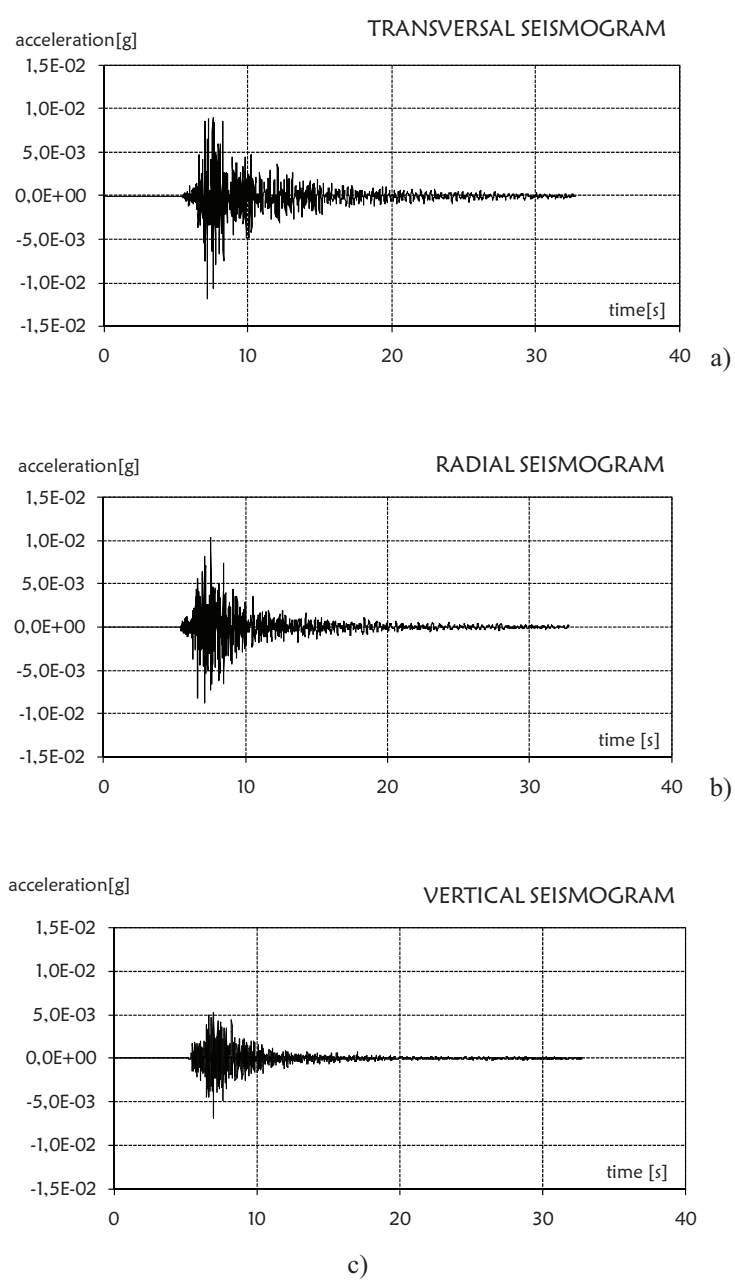


Figura 6. 5. Terremoto vulcanico del Vesuvio del 1999. Sismogrammi registrati nella stazione BKN di Torre del Greco della rete sismica del Vesuvio: a) direzione trasversale; b) direzione radiale; c) direzione verticale.

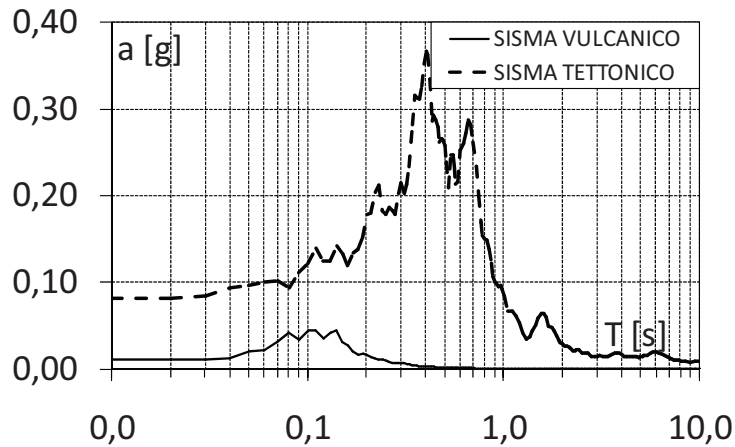


Figura 6. 6. Confronto tra gli spettri di risposta del terremoto tettonico (1980) e di quello vulcanico (1999), in area vesuviana.

Analisi preliminari

Le prime verifiche ad essere condotte sono relative al soddisfacimento della struttura, progettata negli anni Settanta per resistere a soli carichi verticali, alle prescrizioni dell'attuale normativa tecnica italiana (NTC, 2008). A tal proposito, gli Stati Limite Ultimi considerati riguardano combinazioni da carichi verticali (F_{dv}) e da sisma (F_{de}):

$$F_{dv} = 1.3G_1 + 1.5G_2 + 1.5Q_{k1} + 1.5 \cdot 0.5 \cdot Q_{k2} \quad (6.2)$$

$$F_{de} = G_1 + G_2 + 0.3Q_{k1} + E \quad (6.3)$$

dove: G_1 e G_2 sono il peso proprio della struttura e i carichi permanenti, rispettivamente; Q_{k1} è l'azione accidentali prevalente, pari a 2.00 kN/m^2 per i solai e 4.00 kN/m^2 per gli sbalzi e per le scale; Q_{k2} è l'azione accidentale prodotta dalla neve sul tetto; E è l'azione esplicita dal sisma di progetto.

Il comportamento della struttura è valutata attraverso analisi statiche non lineari di tipo incrementale.

In Figura 6.7a è riportata la curva push-over per carichi verticali, con, in ordinata, la risultante dei carichi gravitazionali F e, in ascissa, lo spostamento verticale v_P del punto P appartenente al travetto rompi-tratto del solaio di copertura (Figura 6.2b). Le analisi mostrano come la struttura sia appena in

grado di sostenere il carico F_{dv} (6.2). Esso, infatti, coincide con il carico massimo che la struttura è in grado di esplicare. Il collasso si attinge per formazione di cerniere plastiche prevalentemente nelle colonne, viste le ridotte dimensioni delle sezioni e delle armature. In particolare, si evidenzia un meccanismo da piano soffice nel telaio perimetrale trasversale Y_2 (Figura 6.7b).

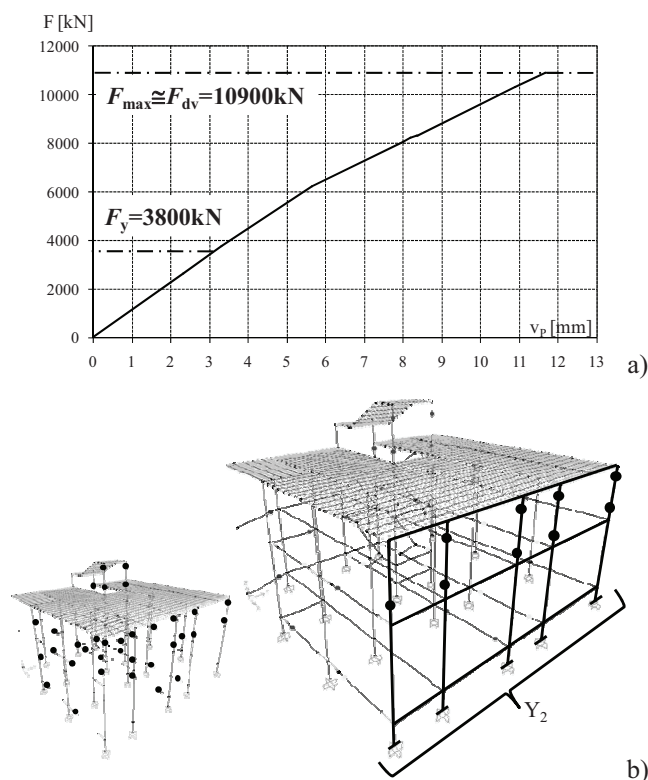


Figura 6. 7. Effetto dei carichi verticali ordinari: a) curva push-over (F_{dv} = carico SLU, NTC2008; F_y = carico corrispondente allo snervamento); b) meccanismo di collasso.

Con riferimento alla combinazione sismica F_{de} (6.3) prevista dalle NTC 2008, le azioni sismiche assunte sono due: la prima è relativa allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e presenta una PGA pari a 0,158g ed un periodo di ritorno pari a 475 anni; la seconda è relativa allo Stato Limite di Collasso (SLC) e presenta una PGA pari a 0,202g e un periodo di ritorno pari a 975 anni.

Per la struttura in esame, l'analisi modale ha mostrato un primo modo di vibrazione traslazionale in direzione Y con periodo T pari a 0.76s, una seconda modo torsionale con T pari a 0.61s e una terza modo traslazionale in direzione X con T pari a 0,40 s.

L'analisi di vulnerabilità sismica è stata eseguita in accordo con i metodi ATC-40 (1996) e N2 (Fajfar, 1999). Entrambi gli approcci hanno restituito gli indici di vulnerabilità della costruzione nei riguardi dei due eventi sismici (Tabella 6.2), come rapporto tra lo spostamento ottenuto e quello ultimo.

Tabella 6. 2. Indici di vulnerabilità sismica dell'edificio in esame.

Direzione	ATC-40		N2	
	SLV	SLC	SLV	SLC
X	10.42	13.76	11.15	16.23
Y	1.05	1.36	1.14	1.50

Secondo entrambe le metodologie applicate, la struttura non risulta in grado di sostenere gli eventi sismici di progetto dell'attuale normativa, infatti gli indici di vulnerabilità, tanto lungo X che lungo Y risultano sempre superiori all'unità, anche se la sensibilità della struttura in direzione X, direzione dei telai caricati, è 10 volte più grande che in direzione Y.

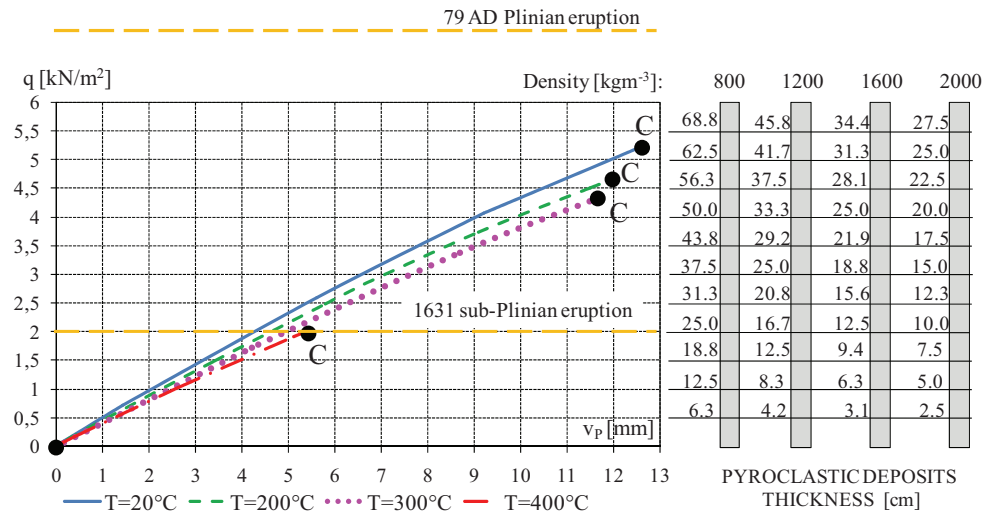
Effetto dei depositi piroclastici

Dopo questo esame preliminare della struttura, si è passati all'analisi dell'effetto delle azioni eccezionali.

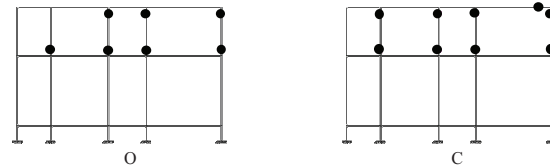
Le conseguenze dei depositi piroclastici sono state studiate attraverso un'analisi statica non lineare di tipo incrementale, che tenesse conto del degrado termico delle proprietà meccaniche dei materiali a contatto con i clasti (Tabella 6.1), con riferimento a quattro diversi valori della temperatura: 20, 200, 300 e 400°C. Le relative curve push-over sono illustrate in Figura 6.8a.

In ordinata, è indicato il sovraccarico q prodotto dai depositi e in ascissa lo spostamento verticale del punto P v_P di Figura 6.2b. L'origine degli assi corrisponde all'applicazione dei carichi propri e permanenti e di un'aliquota dei carichi accidentali, in accordo con la combinazione prevista nelle NTC 2008 in caso di carichi eccezionali:

$$F_{d,0} = G1 + G2 + 0,3Q_{kl} \quad (6.4)$$



a)



b)

Figura 6.8. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: a) curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; b) formazione di cerniere plastiche lungo l'allineamento Y_2 .

Le colonne a destra delle curve push-over in Figura 6.8a indicano lo spessore dei depositi piroclastici, in funzione di quattro valori di densità dei clasti: 800, 1200, 1600 e 2000 kgm⁻³.

L'influenza del degrado termico dei materiali nei riguardi del comportamento strutturale appare evidente, sia in termini di resistenza che di rigidezza.

Il collasso è ancora imputabile a meccanismo di piano soffice dell'ultimo piano del telaio perimetrale, trasversale Y_2 (Figura 6.8b).

Riferendosi ad eruzioni occorse, si può affermare che la struttura non sarebbe in grado di resistere ai depositi da caduta prodotti da un'eruzione pliniana tipo quella del 79d.C., caratterizzata da *ash fall* con densità pari a

800kgm^{-3} e spessore pari a 100cm (Figura 6.9, Sigurdsson et al., 1982), mentre potrebbe resistere ad un'eruzione sub-pliniana tipo quella del 1631 caratterizzata da venti stratosferici prevalenti in direzione S-E e clasti spessi 10cm (Figura 3.8d)

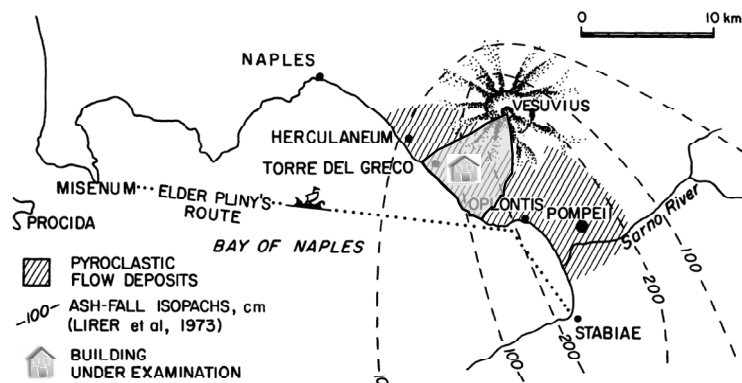


Figura 6. 9. Mappa della regione vesuviana con l'indicazione delle isopache (in cm) prodotte dalla caduta di pomici durante l'eruzione pliniana del 79d.C. (Sigurdsson et al., 1982).

Effetto dei terremoti tettonico e vulcanico

L'effetto dei terremoti tettonico e vulcanico è stato investigato attraverso analisi dinamiche non lineari.

Per ciascuno dei due sismi si sono assunte sia le accelerazioni orizzontali che quelle verticali. In particolare, in direzione X dell'edificio sono applicati i sismogrammi NS- tettonico e trasversale- vulcanico, mentre in direzione Y sono applicati i sismogrammi EW- tettonico e radiale- vulcanico.

I due terremoti, essendo caratterizzati da diversi valori della PGA inducono diversi comportamenti strutturali. Il sisma tettonico produce, infatti, il collasso della struttura secondo un meccanismo di piano soffice all'ultimo piano dell'edificio, mentre, quello vulcanico è responsabile soltanto della formazione di cerniere plastiche alla testa delle colonne del primo livello. La richiesta di duttilità è stata stimata attraverso il parametro di duttilità rotazionale adimensionale D (definito come il rapporto tra la massima rotazione relativa calcolata θ_{\max} e quella al limite di snervamento θ_y) valutato in testa alle colonne per ogni *time history*. La richiesta di duttilità è quindi confrontata con i seguenti valori limite: D_y , D_{DS} e D_U , legati al

raggiungimento degli Stati Limite di Snervamento, di Danno Severo ed Ultimo, rispettivamente, secondo le indicazioni dell'OPCM 3274. In particolare, la rotazione θ_U corrisponde deformazioni ultime del calcestruzzo e dell'acciaio pari al 3,5 ‰ ed al 40 ‰, mentre la rotazione θ_{DS} è assunta pari a 3/4 di θ_U .

In Figura 6.10, i risultati indicati si riferiscono ai telai più vulnerabili, X_1 e Y_2 (Figura 6.2b). Come ci si aspettava, il sisma tettonico produce rotazioni più grandi di quello vulcanico. Ciò può essere attribuito alle sue frequenze principali (2,5-3 Hz), più piccole di quelle della manifestazione vulcanica (8-10Hz).

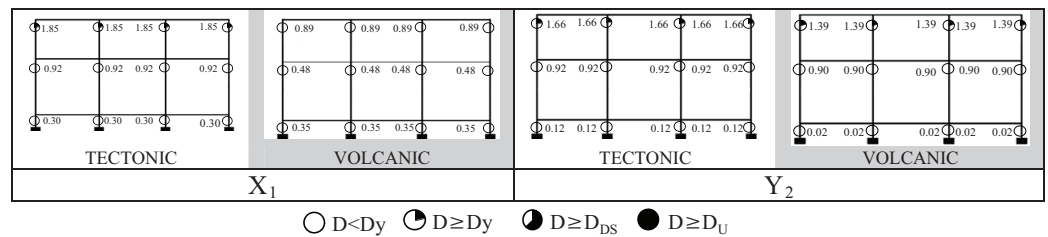


Figura 6. 10. Duttilità rotazionale adimensionale D lungo gli allineamenti X_1 e Y_2 .

Il valore della PGA che produce gli stessi effetti strutturali, sia in caso di terremoto tettonico che vulcanico, è stato identificato, scalando le registrazioni sismiche. Il parametro di controllo del comportamento è la rotazione adimensionale R in testa alle colonne, pari al rapporto tra la massima rotazione θ_{max} e quella ultima θ_U . In totale, sono stati analizzati otto eventi sismici, tre tettonici e cinque vulcanici, i primi ridotto e i secondi amplificati rispetto ai sismogrammi originali (Tabella 6.3).

Tabella 6. 3. PGA [g] delle registrazioni sismiche scalate.

Tectonic seisms	X:	N-S	T1	0.035	T2	0.044	T3	0.058				
	Y:	E-W		0.050		0.062		0.082				
Volcanic seisms	X:	Transverse	V1	0.009	V2	0.017	V3	0.033	V4	0.037	V5	0.044
	Y:	Radial		0.012		0.024		0.045		0.050		0.059

Nella Figura 6.11a, sono riportate le curve che mettono in relazione la massima rotazione adimensionale R con la PGA per gli allineamenti X_1 e Y_2 . I valori ricercati della PGA risultano 0.036g (T1, V4) e 0.060g (T2, V5) in direzioni X e Y, rispettivamente. I risultati delle analisi mostrano che, in

generale, la struttura collassa per un meccanismo di piano soffice al piano superiore, accompagnato da formazione di alcune cerniere plastiche nelle colonne e nelle travi della scala (Figura 6.11b).

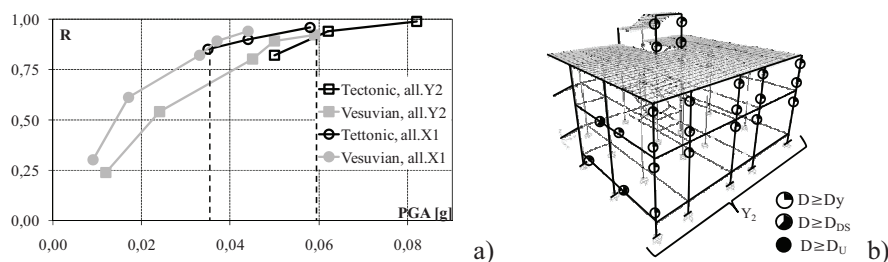


Figura 6. 11. Rotazione adimensionale delle colonne R versus PGA per gli allineamenti X_1 e Y_2 . b) Distribuzione delle cerniere plastiche e meccanismo da piano soffice.

In Figura 6.12 sono illustrati gli accelerogrammi relativi ai quattro terremoti V5, T2, V4 e T1.

Le *time-history* di R indicate in Figura 6.13 (a,b), insieme alle registrazioni sismiche (c-f), con riferimento all'intervallo temporale 0-9s. I risultati mostrano che il collasso ($R = 1$) si verifica, dopo circa 1.5s per i sismi tettonici T1 e T2 (PGA pari 0.044g e 0.035g in direzione X; PGA pari 0.062g e 0.050g in direzione Y) e dopo circa 8.5s per i sismi vulcanici V4 e V5 (PGA pari 0.044g e 0.037g in direzione X; PGA pari 0.059g e 0.050g in direzione Y). Dunque, a parità di PGA, la struttura va in crisi dopo un tempo più breve nel caso di sisma tettonico rispetto a quello vulcanico. Questo perché sebbene le registrazioni tettoniche presentino la massima accelerazione dopo 17s, nell'intervallo 0-9s, sono caratterizzate da oscillazioni apprezzabili in termini di ampiezza e frequenza (Figura 6.13c,d), mentre le registrazioni vulcaniche presentano trascurabili oscillazioni fino a circa 6s, raggiungendo la massima accelerazione dopo 7.5s (Figura 6.13e,f).

In sintesi, la struttura, che si ricorda non rispettare gli attuali requisiti di progettazione sismica, appare più sensibile all'evento tettonico che non a quello vulcanico. Quest'analisi, però, pur fornendo utili informazioni sull'argomento, non ha alcuna pretesa di fornire indicazioni generali, visto che i risultati ottenuti sono legati ad un'unica costruzione ed a specifiche registrazioni sismiche.

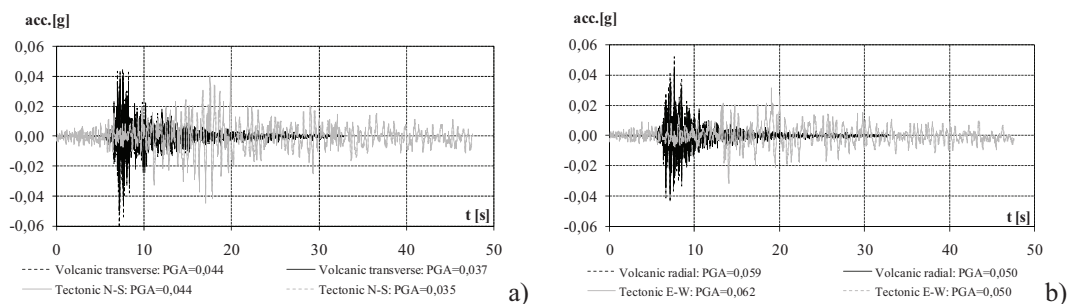


Figura 6. 12. Accelerogrammi scalati: a)X; b)Y.

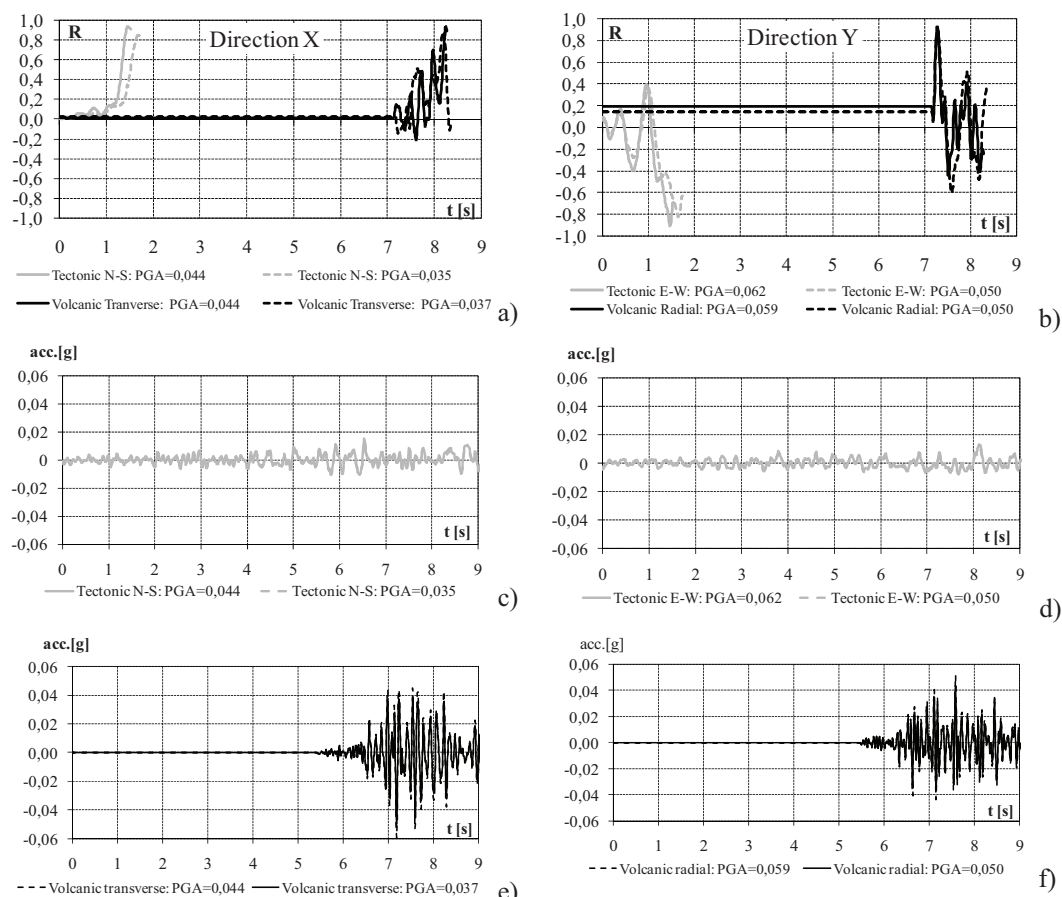


Figura 6. 13.. a-b)Time histories di R; c-e) Accelerogrammi scalati per i terremoti tettonici (c-d) e vulcanici (e-f), nell'intervallo temporale 0-9s.

6.2.1 Edilizia scolastica

Casi studio

Dalla campagna di rilievi effettuata, l'edilizia scolastica di Torre del Greco risulta realizzata in archi temporali diversi, con differenti tecniche e materiali strutturali.

Con riferimento alle strutture in c.a., sono state analizzate due scuole medie, la *Beato Vincenzo Romano* e la *Francesco D'Assisi*, rappresentative di due importanti archi temporali. La prima, infatti, è progettata secondo il Regio Decreto del 16 Novembre 1939, rimasto in vigore per oltre trent'anni; mentre la seconda è progettata in accordo con il Decreto Ministeriale 26 Marzo 1980, diretta conseguenza della Legge 5 Novembre 1971 n° 1086, che sostituì il Regio Decreto del 1939.

Per questi due complessi scolastici, allo scopo di sopperire alla mancanza di documenti progettuali originari, si è proceduto con un rilievo completo delle strutture, associato a prove di tipo non distruttivo per avere informazioni sui materiali in uso (sclerometro) e per individuare posizione e diametro delle armature, dimensioni del copriferro e orditura dei solai (pacometro).

La scuola media *Beato Vincenzo Romano* è ubicata nel comune di Torre del Greco, in via Lombardia n°7 (Figura 6.14).

In Figura 6.15 sono illustrate le piante architettoniche.

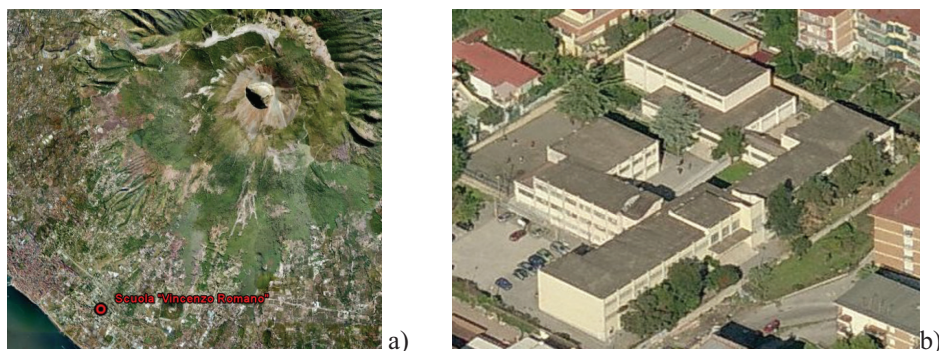


Figura 6. 14. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*:
a) inquadramento territoriale; b) vista aerea.

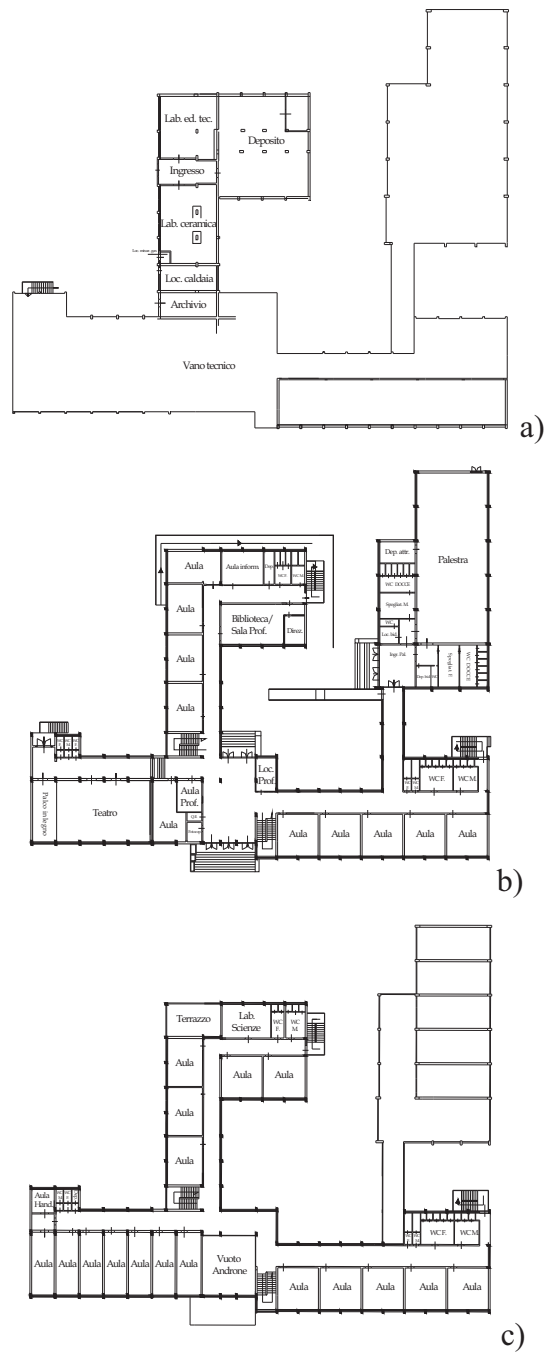
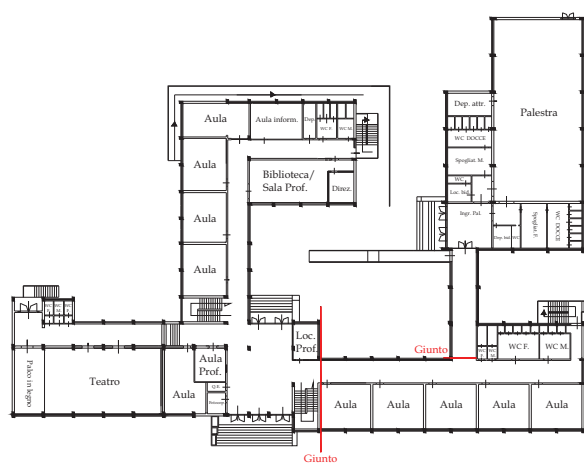


Figura 6. 15. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) pianta piano terra; b) pianta piano rialzato; c) pianta piano primo.

Il complesso scolastico risulta caratterizzato da tre corpi di fabbrica separati da giunti strutturali di dimensione pari a circa 10 cm (Figura 6.16).



a)



b)



c)

Figura 6. 16. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) corpi di fabbrica; b) posizione dei giunti in pianta; c) immagini dei giunti.

Il *corpo di fabbrica 1* è costituito da un piano seminterrato e da due piani fuori terra. L'altezza del piano seminterrato risulta essere costante e pari a 2,70m. L'altezza del primo livello non è costante, ma pari a 4,20m in corrispondenza dell'ala contenente il teatro e pari a 3,00m per il resto del piano. Il secondo livello ha un'altezza di 3,00m costante per tutto il piano.

L'ingresso ha un'altezza di 6,80m (escluso il seminterrato) ed è caratterizzato da travi emergenti di dimensioni elevate (Figura 6.17a).

Il teatro è caratterizzato da un'altezza di 4,20m e dalla presenza di travi a coda di rondine (Figura 6.17b).



Figura 6. 17. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) ingresso; b) teatro.

Il corpo di fabbrica 2 è costituito da un fabbricato ad L, disposto su due livelli di altezza pari a 3,00m ciascuno.

Per entrambi i corpi di fabbrica, i solai di copertura e di piano risultano essere del tipo latero- cementizio gettati in opera, di altezza pari a 30cm. L'orditura è indicata in Figura 6.18.

La copertura risulta essere piana e dotata di un massetto delle pendenze e di guaina impermeabile (Figura 6.19a,b).

Le scale sono a soletta rampante, del tipo latero- cementizio gettate in opera (Figura 6.19c).

Le tamponature esterne sono costituite da blocchi di lapilli (Figura 6.19d).



Figura 6. 19. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a)copertura; b) copertura del vano scala; c) scala con soletta rampante; d) tamponature con blocchi di lapilli.

Le travi presenti sono del tipo a spessore all'interno delle aule ed emergente nel resto della struttura (Figura 6.20a,b). Sono presenti anche delle travi a coda di rondine nell'ala contenente il teatro e nella palestra (Figura 6.20c,d).

I pilastri (Figura 6.20e). risultano essere orientati nella direzione dei telai portanti e le dimensioni più frequenti sono 30x50, 30x70 e 40x70 (per la palestra).

I telai portanti risultano monodirezionali con travi di collegamento trasversali.

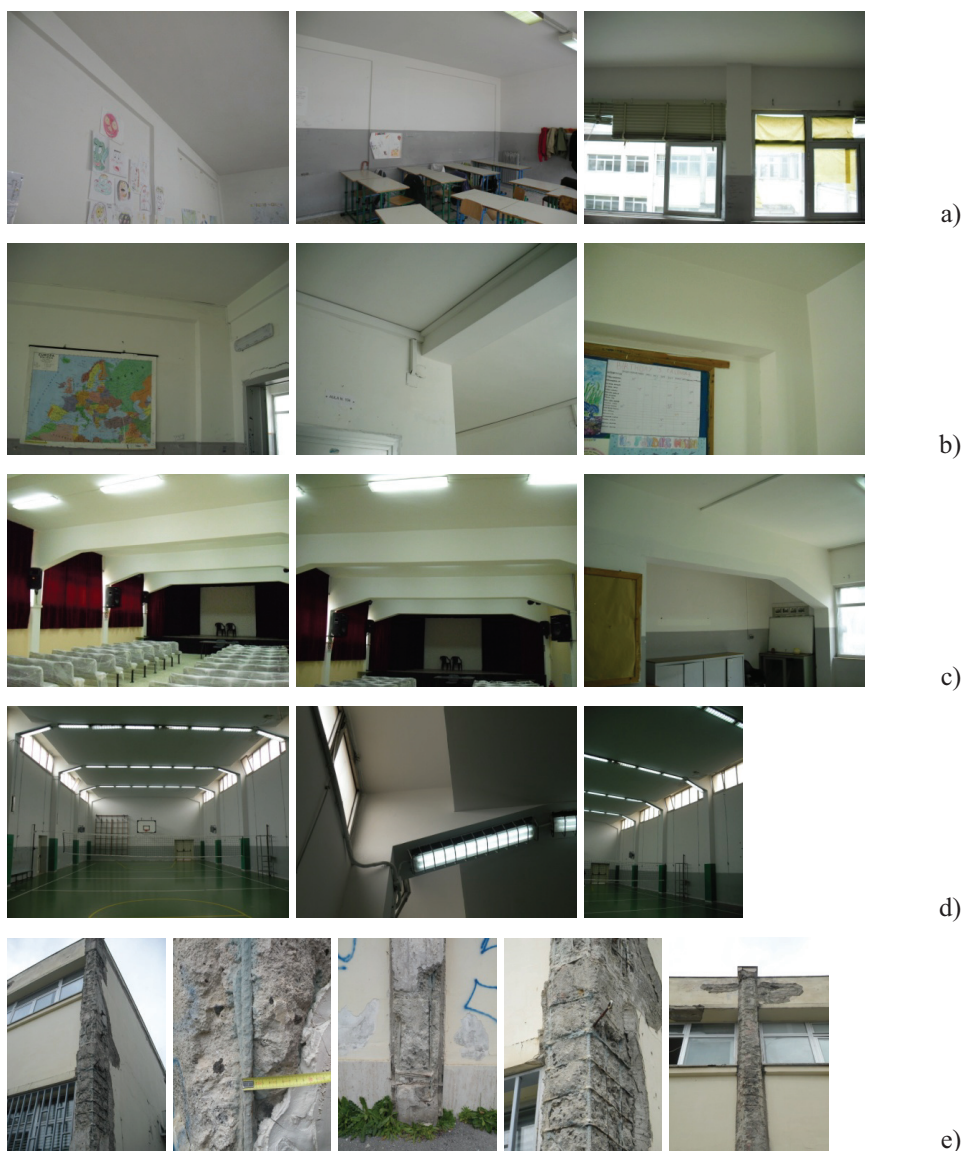


Figura 6. 20. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) travi a spessore, b)travi emergenti; c) travi a coda di rondine del teatro; d) travi a coda di rondine della palestra; e) pilastri.

Il sopralluogo effettuato ha messo in luce la presenza di uno stato di conservazione della struttura non efficiente (Figura 6.21). Essa presenta, infatti: infiltrazioni nella copertura della palestra per effetto del distacco della guaina impermeabilizzante; espulsione dei copriferri delle travi e dei pilastri

(allo scopo di intervenire per le normali condizioni, i copri ferri sono stati fatti saltare completamente); distacco di intonaco in corrispondenza delle aperture e del solaio di copertura della scala di accesso alla copertura.

In relazione alla vulnerabilità vulcanica, oltre alla presenza di coperture piane, si registra una totale assenza di protezioni alle finestre (Figura 6.22a) e la presenza di muri perimetrali in tufo alti circa 2,00m, lungo tutto il perimetro del complesso scolastico (Figura 6.22b).



Figura 6. 21. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) infiltrazioni della copertura della palestra; b-c) espulsione copriferrì; d) espulsione intonaco interno.



Figura 6. 22. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) assenza di protezioni alle finestre; b) muro esterno perimetrale.

La scuola media *Francesco D'Assisi* è ubicata nel comune di Torre del Greco, in viale Campania n°1 (Figura 6.23).

In Figura 6.24 sono illustrate le piante architettoniche.

Il complesso scolastico risulta caratterizzato da sette corpi di fabbrica separati da giunti strutturali di dimensione pari a circa 10 cm, con il corpo 1 che si ripete tra volte ed il corpo 3 (palestra) che si ripete due volte (Figura 6.25).

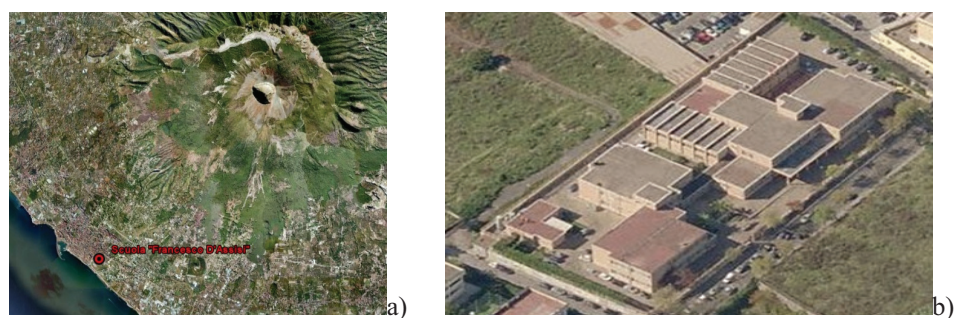


Figura 6. 23. Scuola media *Francesco D'Assisi*:
a) inquadramento territoriale; b) vista aerea.

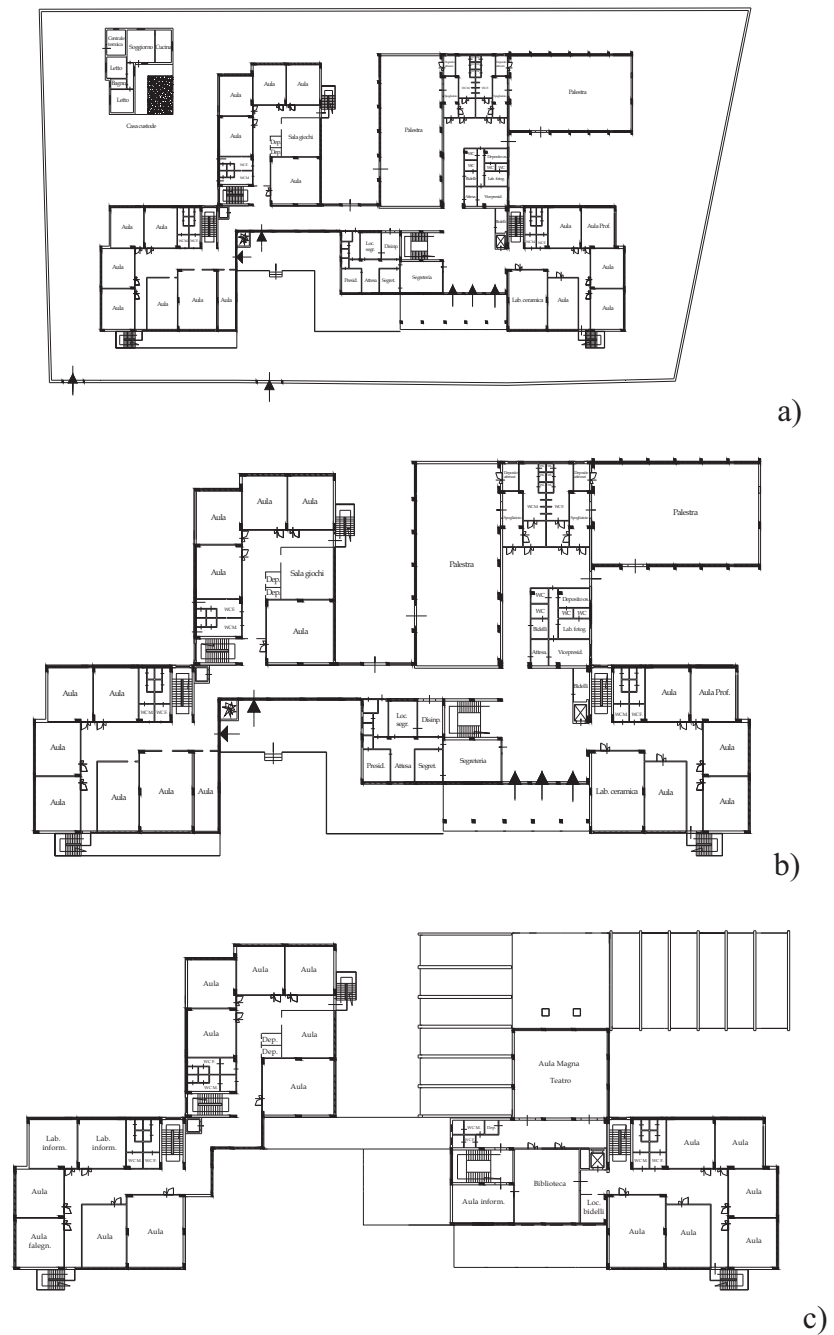
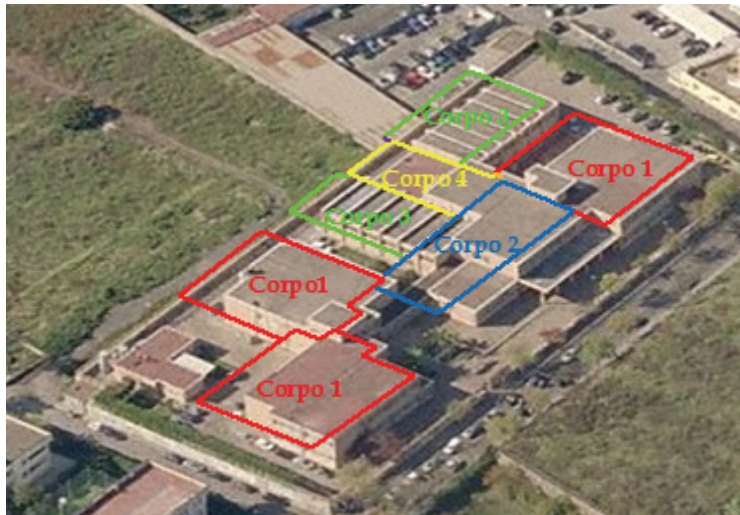
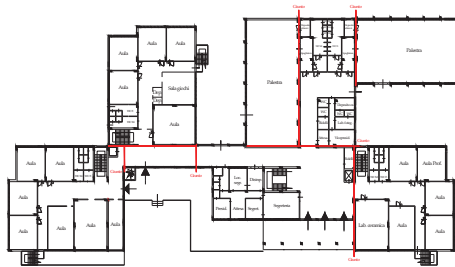


Figura 6. 24. Scuola media *Francesco D'Assisi*: a) pianta area esterna; b) pianta piano terra rialzato; c) pianta piano primo.



a)



b)



c)

Figura 6. 25. Scuola media *Beato Vincenzo Romano*: a) corpi di fabbrica; b) posizione dei giunti in pianta; c) immagini dei giunti.

Per tutti i corpi di fabbrica, i solai di copertura e di piano risultano essere del tipo latero- cementizio gettati in opera, di altezza pari a 30cm (Figura 6.26a).

La copertura risulta essere piana e dotata di un massetto delle pendenze e di guaina impermeabile (Figura 6.26b).

Le scale sono a soletta rampante, del tipo latero- cementizio gettate in opera (Figura 6.26c).

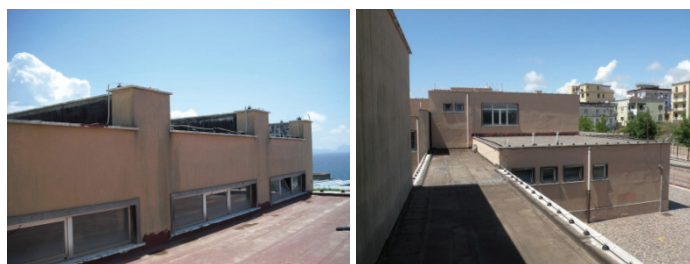
Le tamponature esterne sono costituite da blocchi di lapilli.

Le travi presenti sono del tipo emergente nella totalità della struttura (Figura 6.27), ad esclusione dell'ingresso e della biblioteca.

I pilastri risultano essere orientati nella direzione dei telai portanti e le dimensioni più frequenti sono 30x50, 30x70 e 40x70 (per la palestra).



a)



c)



d)

Figura 6. 26. Scuola media *Francesco d'Assisi*: a) solai; b) copertura; c) scala con soletta rampante.



Figura 6. 27. Scuola media *Francesco D'Assisi*: particolare travi.

Il sopralluogo effettuato ha messo in luce la presenza di un buono stato di conservazione della struttura, fatta eccezione per alcune infiltrazioni d'acqua al piano terra ed il distacco di una parte dell'intonaco esterno (Figura 6.28).

In relazione alla vulnerabilità vulcanica, oltre alla presenza di coperture piane, si registra una totale assenza di protezioni alle finestre (Figura 6.29a) e la presenza di muri perimetrali in c.a. con inferriata alti circa 1,50m, lungo tutto il perimetro del complesso scolastico (Figura 6.29b).

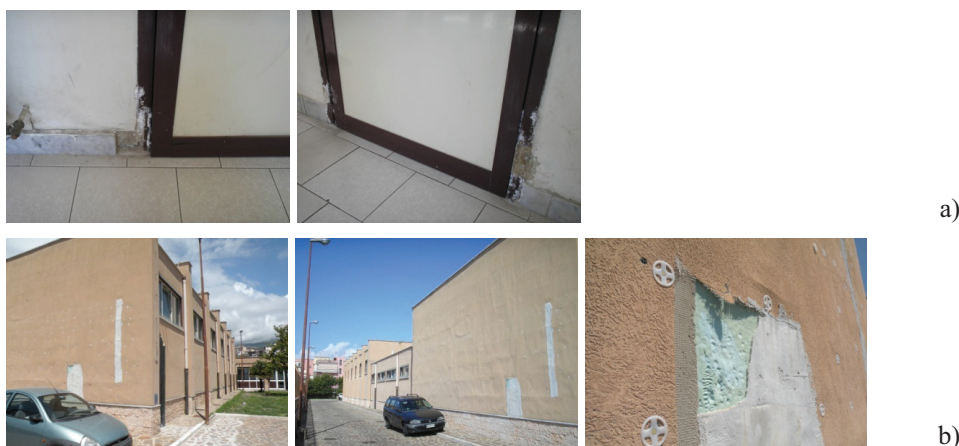


Figura 6. 28. Scuola media *Francesco D'Assisi*: a) infiltrazioni al piano terra;
b) distacco intonaco esterno.



Figura 6. 29. Scuola media *Francesco D'Assisi*: a) assenza di protezioni alle finestre; b) muro esterno perimetrale.

Per entrambe le scuole in esame, in accordo con le NTC 2008, il livello di conoscenza raggiunto è di tipo LC1. Infatti, la geometria è nota sulla base delle piante architettoniche (fornite dal Comune di Torre del Greco) e dei rilievi effettuati. I dettagli costruttivi sono ricavati sulla base di un progetto simulato eseguito secondo la pratica di costruzione dell'epoca. Le caratteristiche meccaniche dei materiali sono quelli tipici dei periodi di realizzazione delle strutture, convalidate da limitate prove in- situ sugli elementi più importanti.

In particolare, la progettazione simulata si fonda sull'analisi di tre aspetti fondamentali: normative tecniche vigenti all'epoca della progettazione/costruzione; manualistica autorevole; progetti tipici del periodo e consuetudini costruttive.

Le principali fonti normative di riferimento sono:

- per la scuola Beato Vincenzo Romano:
 - Regio Decreto 16/11/1939 n°2229 "Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato"
- per la scuola Francesco D'Assisi:
 - Legge 5 novembre 1971 n°1086 "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".

- Decreto Ministeriale LL.PP. 30 maggio 1972 n°180 "Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso e per le strutture metalliche";
- Decreto Ministeriale 30 maggio 1974 "Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche";
- Decreto Ministeriale 16 giugno 1976 "Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche";
- Decreto Ministeriale 26 marzo 1980 "Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche" .

A seguito della completa identificazione delle strutture, si sono implementati i modelli agli elementi finiti mediante il programma SAP2000, V.11.

Travi e colonne sono state modellate come elementi monodimensionali (*frame*), mentre il comportamento da piano infinitamente rigido, prodotto dalla soletta in c.a., è modellata attraverso il vincolo ad hoc sui nodi (*diaphragm*).

Nelle estremità di travi e pilastri e nella mezzeria delle travi, sono state assegnate delle cerniere plastiche a comportamento elastico-perfettamente plastico, in accordo la le normativa sismica italiana (OPCM 3431, 2005). Per le colonne, la combinazione carico assiale- momento flettente è stata considerata.

L'effetto di una possibile eruzione vesuviana sui due complessi scolastici è stato stimato in riferimento a due azioni eccezionali:

1. depositi da caduta in copertura;
2. flussi piroclastici sulle facciate esposte al Vesuvio.

Analisi preliminari

Le prime verifiche ad essere condotte sono relative al soddisfacimento delle strutture alle prescrizione dell'attuale normativa tecnica italiana (NTC, 2008).

A tal proposito, gli Stati Limite Ultimi considerati riguardano combinazioni da carichi verticali (F_{dv}) e da sisma (F_{de}), come indicato nel par. 6.2.1

Il comportamento della struttura è valutata attraverso analisi statiche non lineari di tipo incrementale.

Per ciascuno dei corpi esaminati, le strutture non risultano in grado di sostenere la combinazione di carico ultima per carichi verticali F_{dv} (6.2)

Con riferimento alla combinazione sismica F_{de} (6.3) prevista dalle NTC 2008, le azioni sismiche assunte sono due: la prima è relativa allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e presenta una PGA pari a 0,158g ed un periodo di ritorno pari a 475 anni; la seconda è relativa allo Stato Limite di Collasso (SLC) e presenta una PGA pari a 0,202g e un periodo di ritorno pari a 975 anni.

Le analisi di vulnerabilità sismica sono state eseguite in accordo con i metodi ATC-40 (1996) e N2 (Fajfar, 1999). Entrambi gli approcci hanno restituito gli indici di vulnerabilità delle costruzioni nei riguardi dei due eventi sismici, come rapporto tra lo spostamento ottenuto e quello ultimo. Secondo entrambe le metodologie applicate, le strutture non risultano in grado di sostenere gli eventi sismici di progetto dell'attuale normativa, infatti gli indici di vulnerabilità, tanto lungo X che lungo Y risultano sempre superiori all'unità, specie per la scuola *Romano*.

Effetto dei depositi piroclastici

Dopo questo esame preliminare delle strutture, si è passati all'analisi dell'effetto delle azioni eccezionali.

Con riferimento ai depositi piroclastici da caduta, in accordo con quanto indicato nel par.3.3.2, lo schema scelto per l'azione è quello di un carico gravitazionale uniformemente distribuito in copertura, con densità pari a 8, 12, 16 e 20kgm⁻³. Le conseguenze dei depositi sono state studiate attraverso un'analisi statica non lineare di tipo incrementale, che tenesse conto del degrado termico delle proprietà meccaniche dei materiali a contatto con i clasti (Tabella 6.1), con riferimento a quattro diversi valori della temperatura: 20, 200, 300 e 400°C.

Le relative curve push-over sono illustrate nelle Figure 6.30-32 per i tre corpi della scuola *Romano* e nelle Figure 6.33-36 per i quattro corpi della scuola *D'Assisi*. In ordinata, è indicato il sovraccarico q prodotto dai depositi

e in ascissa lo spostamento verticale v_P del punto P. L'origine degli assi corrisponde all'applicazione dei carichi propri e permanenti e di un'aliquota dei carichi accidentali, in accordo con la combinazione $F_{d,0}$ prevista nelle NTC 2008 in caso di carichi eccezionali:

$$F_{d,0} = G_1 + G_2 + 0,6Q_{k1} \quad (6.5)$$

dove: G_1 e G_2 sono il peso proprio della struttura e i carichi permanenti, rispettivamente; Q_{k1} è l'azione accidentali prevalente, pari a 3.00kN/m^2 per i solai e 4.00kN/m^2 per gli sbalzi e per le scale.

Le colonne a destra delle curve push-over nelle Figura 6.30-36 indicano lo spessore dei depositi piroclastici, in funzione di quattro valori di densità dei clasti: 800, 1200, 1600 e 2000kgm^{-3} .

L'influenza del degrado termico dei materiali nei riguardi del comportamento strutturale appare evidente, sia in termini di resistenza che di rigidezza. Il collasso è, in ogni caso, imputabile ad un meccanismo di trave a livello della copertura.

Riferendosi ad eruzioni occorse, si può affermare che in generale, le strutture analizzate non sono in grado di resistere ai depositi da caduta prodotti da un'eruzione pliniana tipo quella del 79d.C., caratterizzata da *ash fall* con densità pari a 800kgm^{-3} e spessore pari a 100cm (Figura 6.9). Fanno eccezione, però, i corpi 2 e 3 della Romano ed il corpo 3 della D'Assisi, sempre che la temperatura dei clasti si mantenga sotto i 200°C . Invece, nel caso di un'eruzione sub-pliniana tipo quella del 1631 caratterizzata da venti stratosferici prevalenti in direzione S-E e clasti spessi 10cm (Figura 3.8d), le strutture analizzate, in generale, sono in grado di resistere, fatta eccezione per i corpi 1, 2 e 4 della D'Assisi per temperature dei clasti superiori ai 200°C .

E' fondamentale osservare che le analisi illustrate si riferiscono alle sole strutture intelaiate. Il comportamento degli impalcati di copertura, che, in genere, sono gli elementi più sensibili ai depositi da caduta, è completamente trascurato. L'effetto degli *ash fall* su di essi è trattato nel par. 6.3.

Effetto dei flussi piroclastici

I flussi piroclastici sono stati schematizzati, in accordo con quanto indicato nel par. 3.4.2, come una pressione orizzontale q uniformemente sulla facciata esposta ed una depressione pari a $q/3$ sulla facciata esposta.

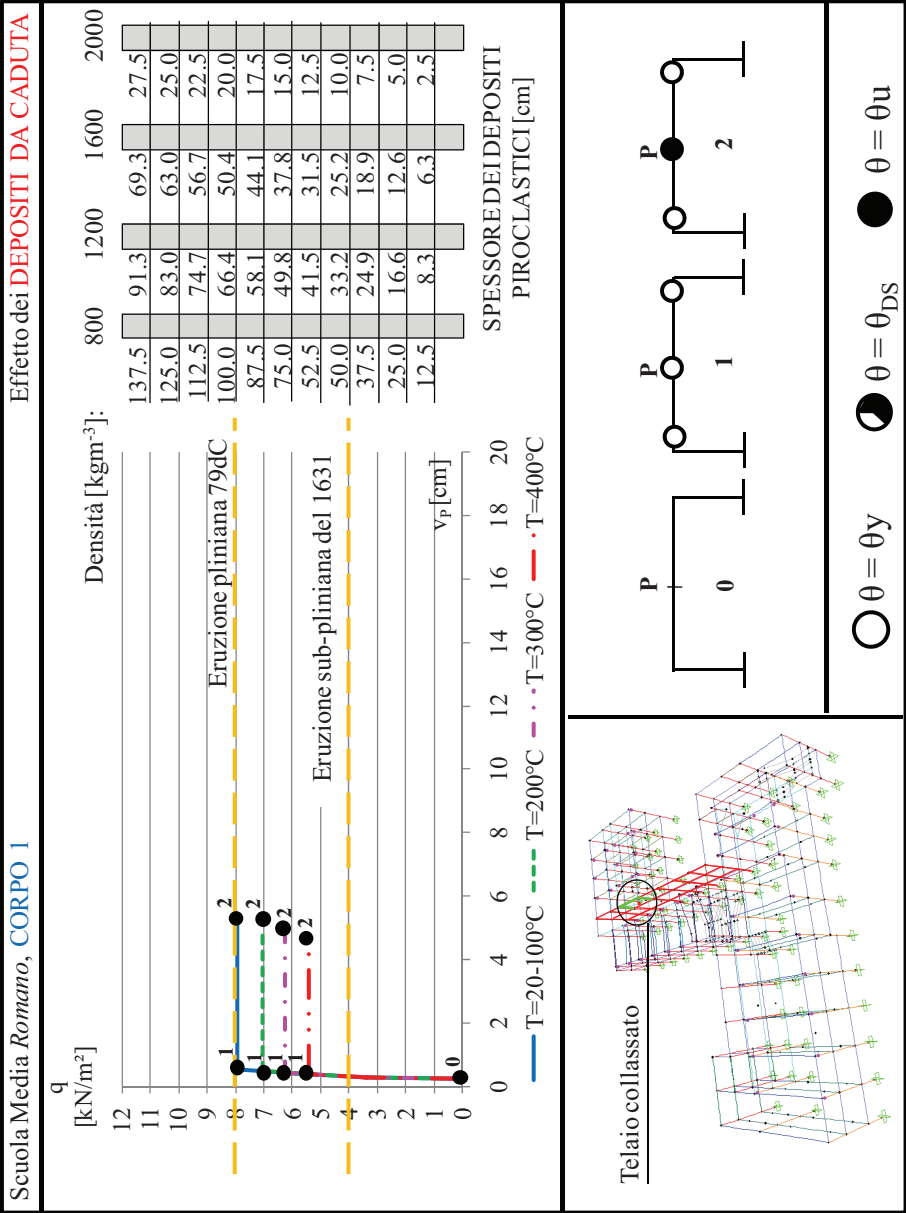


Figura 6. 30. Scuola media *Romano*, corpo 1. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.

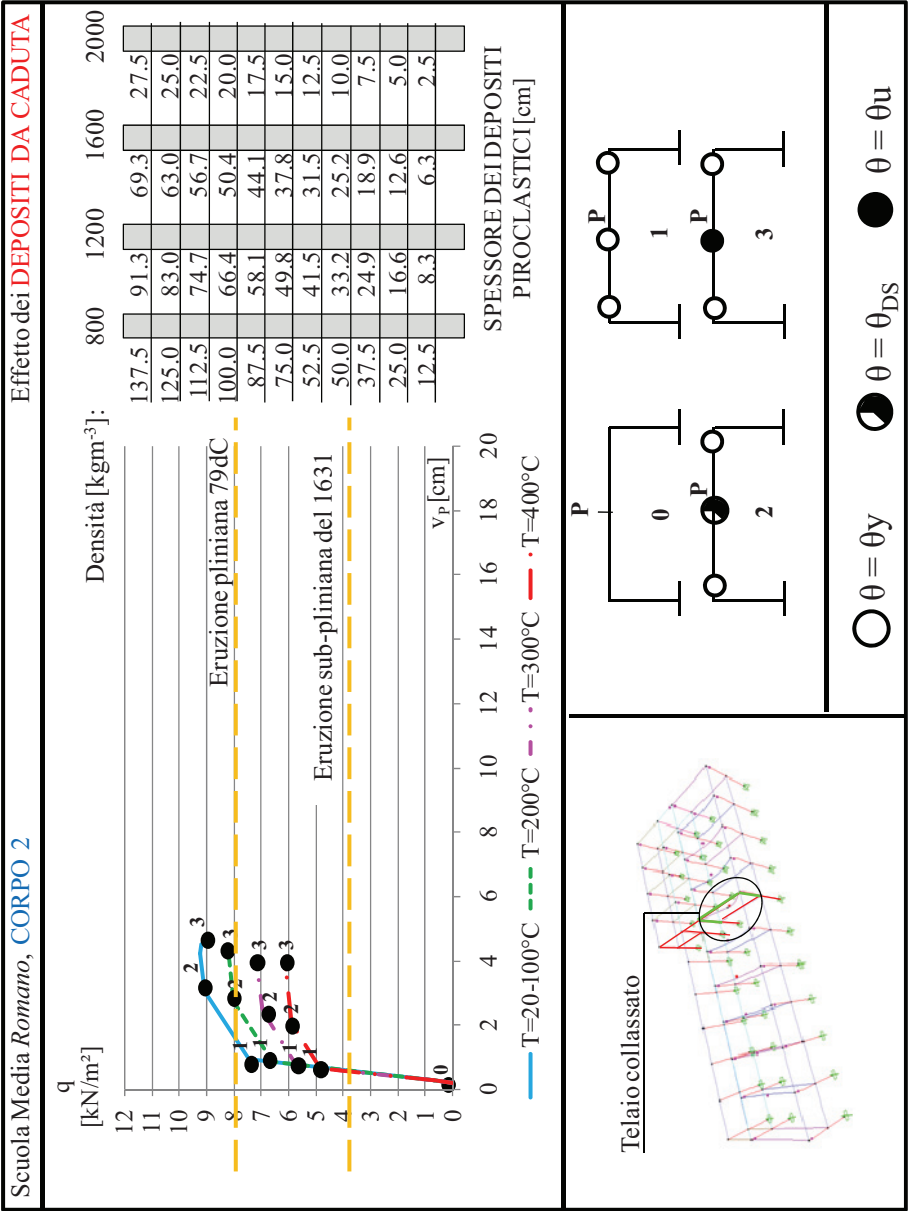


Figura 6. 31. Scuola media *Romano*, corpo 2. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.

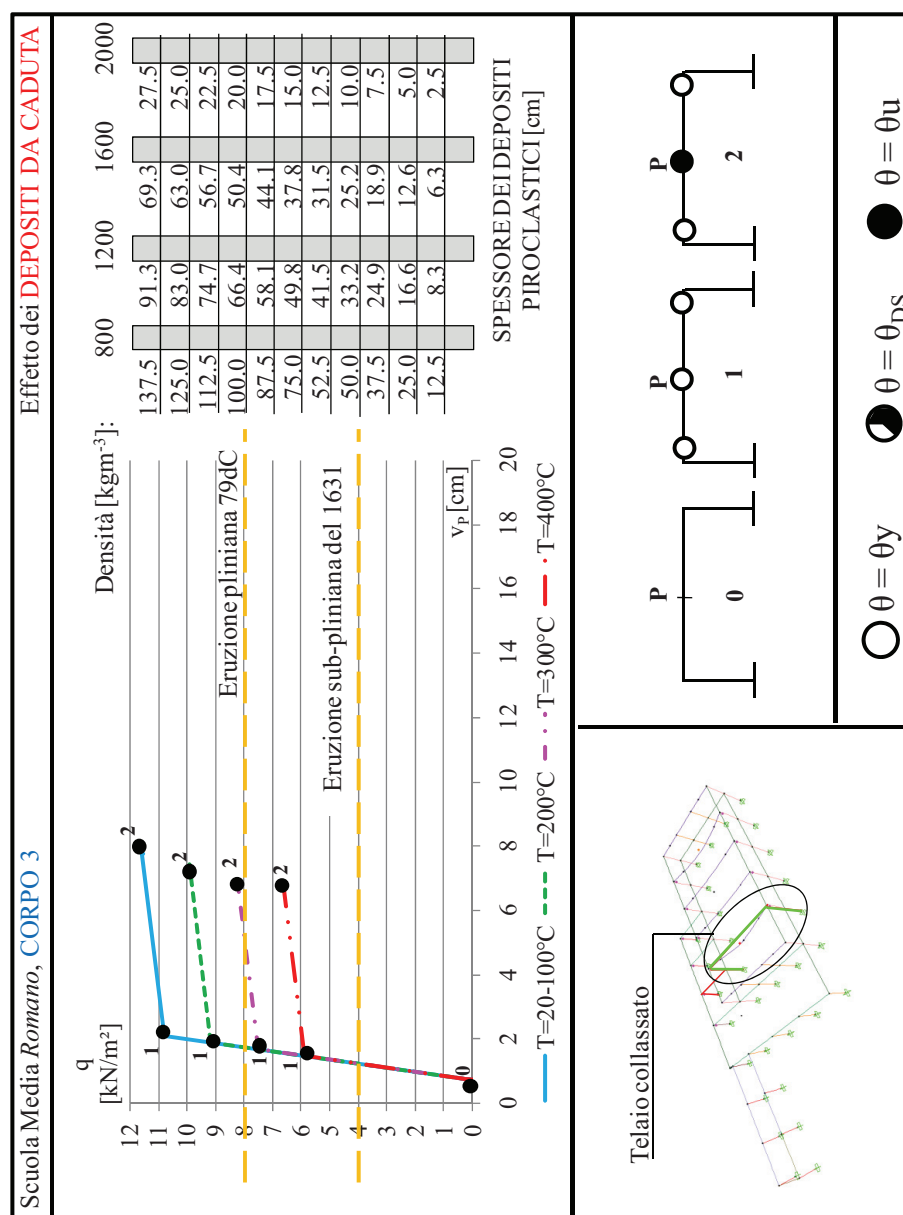


Figura 6. 32. Scuola media *Romano*, corpo 3. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.

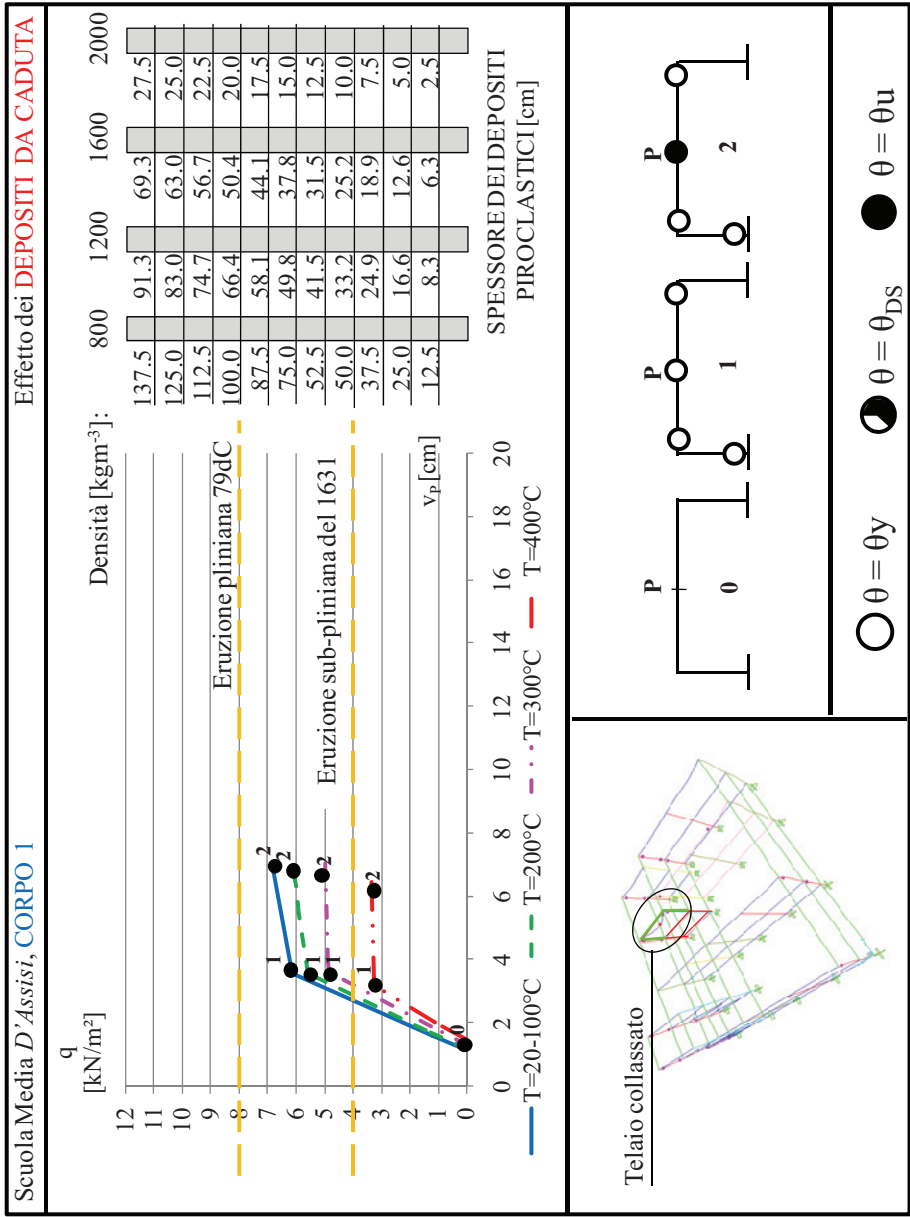


Figura 6. 33. Scuola media D'Assisi, corpo 1. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.

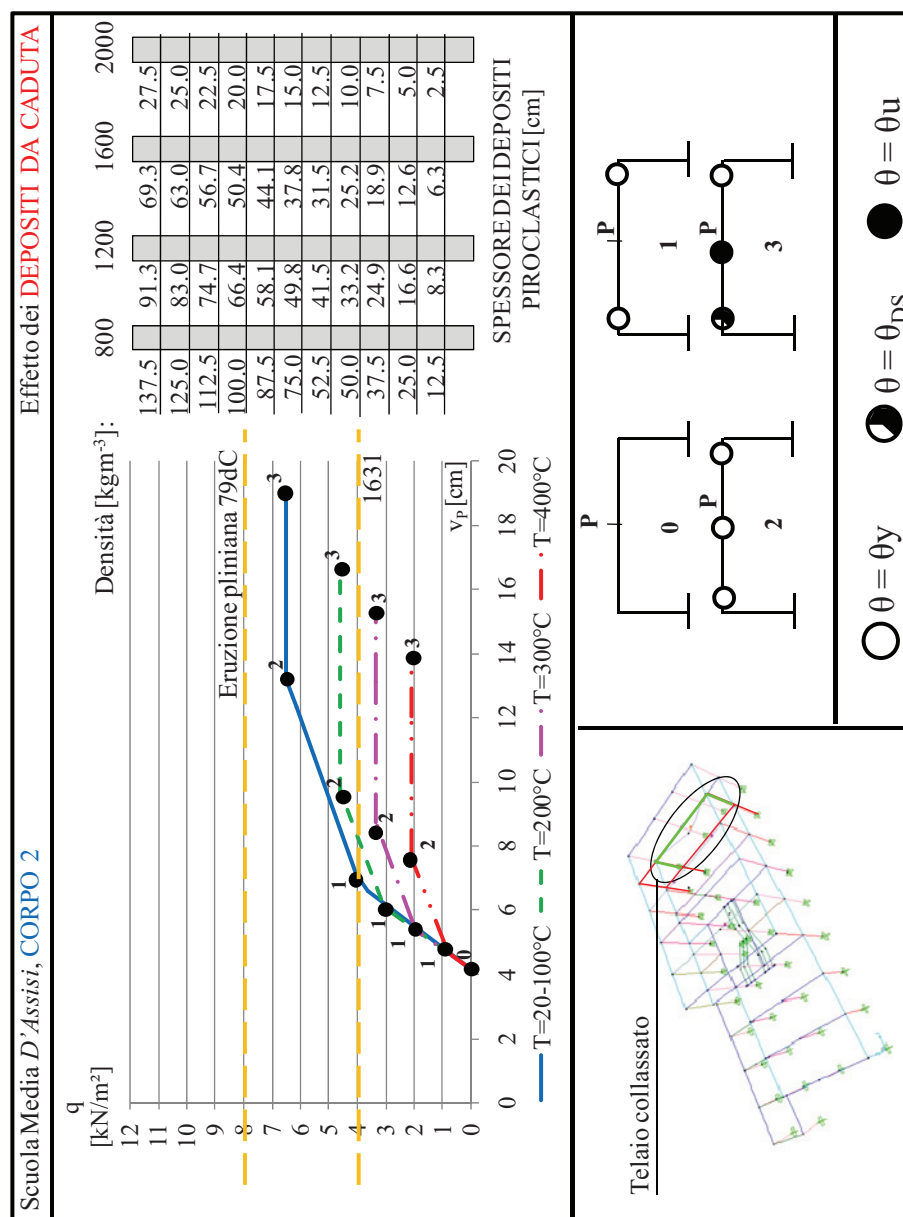


Figura 6. 34. Scuola media *D'Assisi*, corpo 2. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.

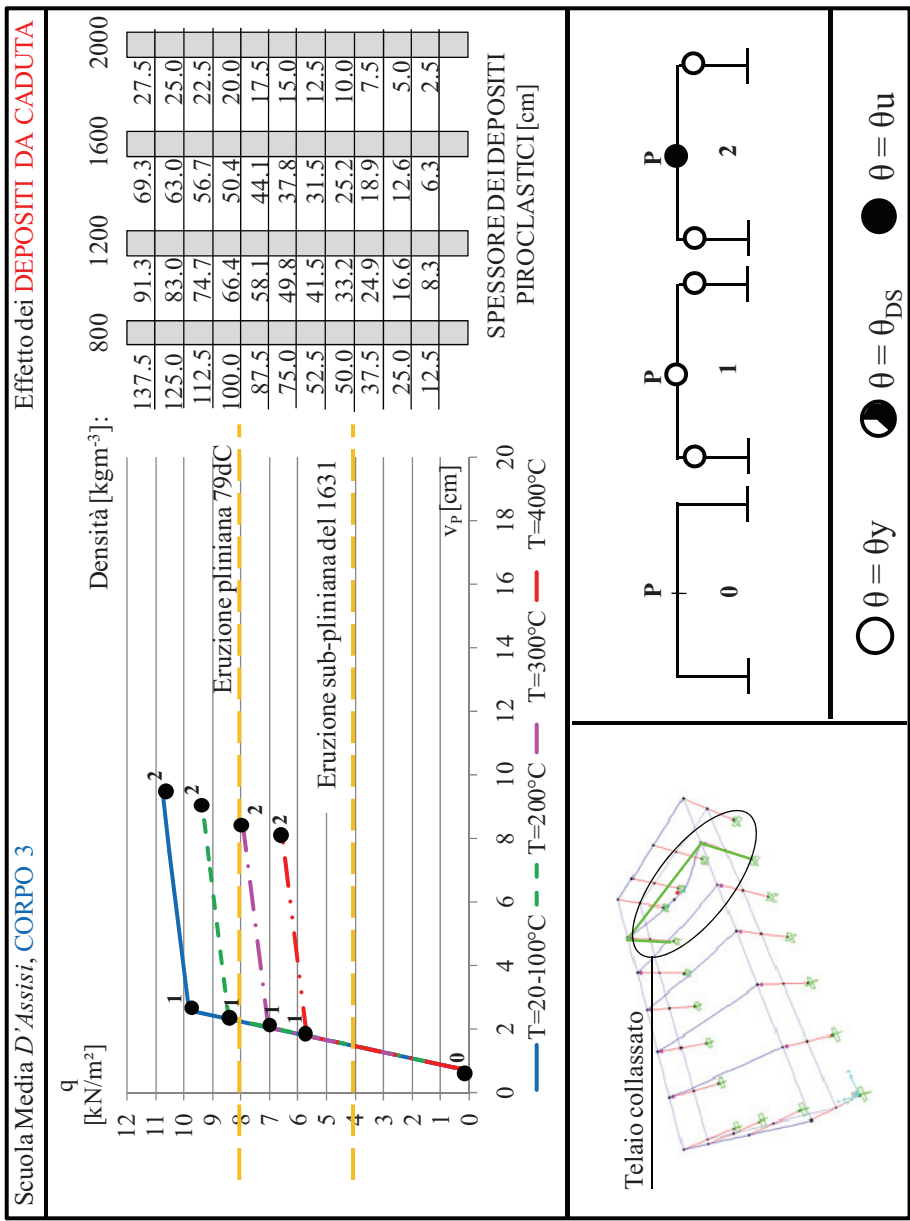
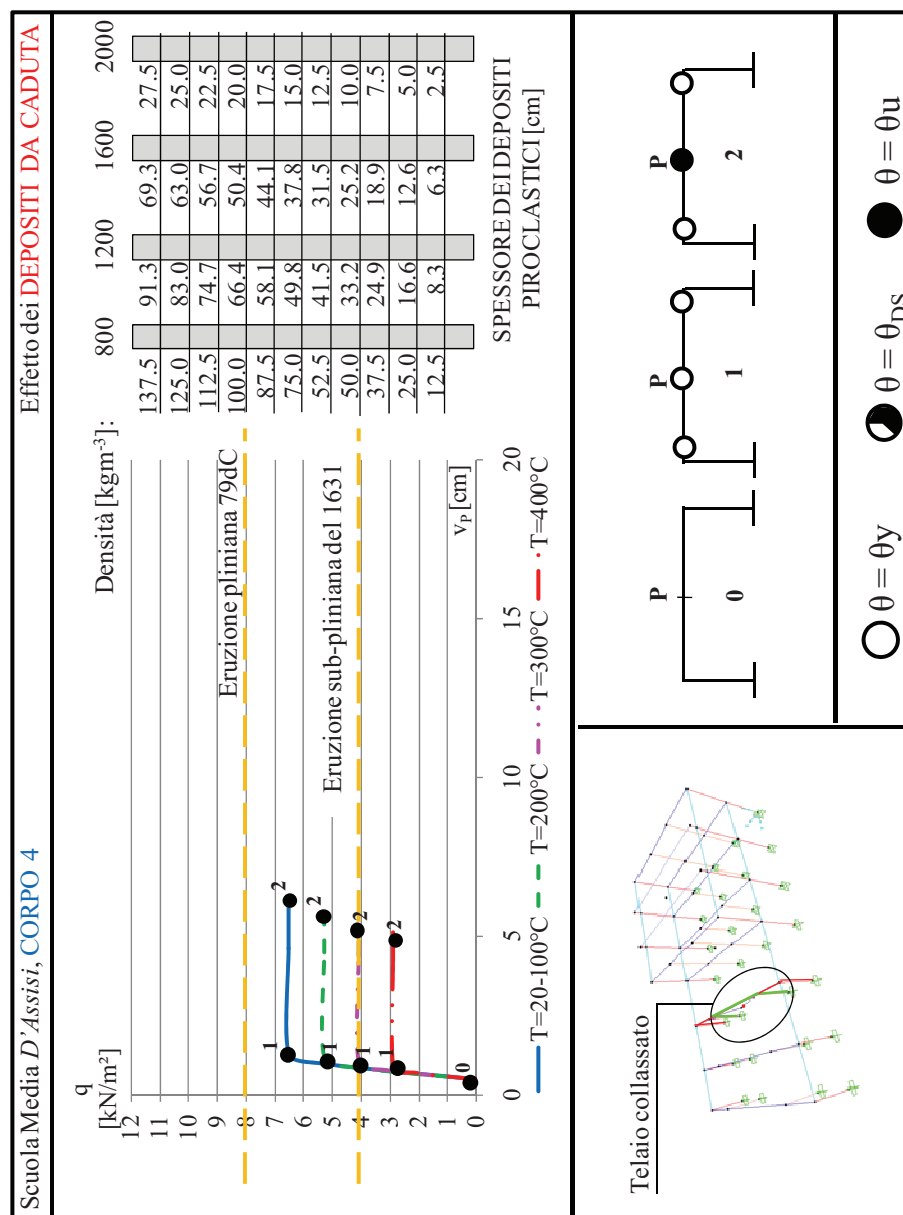


Figura 6. 35. Scuola media D'Assisi, corpo 3. Effetto dei depositi piroclastici da caduta: curve push-over per carico gravitazionale uniforme in copertura, in funzione della temperatura, della densità e dello spessore dei clasti; meccanismi di collasso.



Le conseguenze dei flussi piroclastici sono state studiate attraverso un'analisi statica non lineare di tipo incrementale, che tenesse conto del degrado termico delle proprietà meccaniche dei materiali a contatto con i clasti (Tabella 6.1), con riferimento a quattro diversi valori della temperatura: 20, 200, 300 e 400°C. Le analisi sono estese alle sole strutture con facciata esposta fronte vulcano, cioè ai corpi 2 e 3 della *Romano* e ai corpi 1 e 2 della *D'Assisi*.

Le pressioni sono distribuite agli elementi travi e colonne delle facciate investite, secondo lo schema per aree di influenza indicato in Figura 6.37.

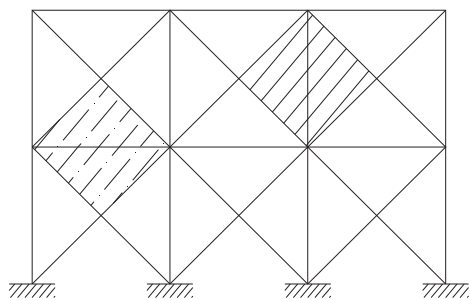


Figura 6. 37. Distribuzione delle pressioni prodotte dai flussi piroclastici agli elementi travi e colonne della facciata esposta.

Le curve push-over relative ai flussi piroclastici sono illustrate nelle Figure 6.38-39 per i due corpi della scuola *Romano* e nelle Figure 6.40-41 per i due corpi della scuola *D'Assisi*. In ordinata, è indicata la pressione orizzontale q prodotta dai flussi e in ascissa lo spostamento orizzontale massimo w della testa delle colonne dell'ultimo piano. L'origine degli assi corrisponde all'applicazione dei carichi propri e permanenti e di un'aliquota dei carichi accidentali, in accordo con la combinazione $F_{d,0}$ (6.5) prevista nelle NTC 2008 in caso di carichi eccezionali.

Nel caso dei flussi piroclastici, si evince la minore influenza delle temperature degli elementi esposti.

In generale, le strutture intelaiate sembrerebbero ben resistere ai flussi prodotti da un'eruzione sub-Pliniana tipo quella del 1631, ma non ad un'eruzione pliniana tipo quella del 79dC. I meccanismi di collasso sono, in genere, imputabili a formazione di cerniere plastiche in testa ed al piede delle colonne. Gli elementi più vulnerabili ai flussi, ossia tamponature e aperture, verranno esaminati nel par. 6.5.

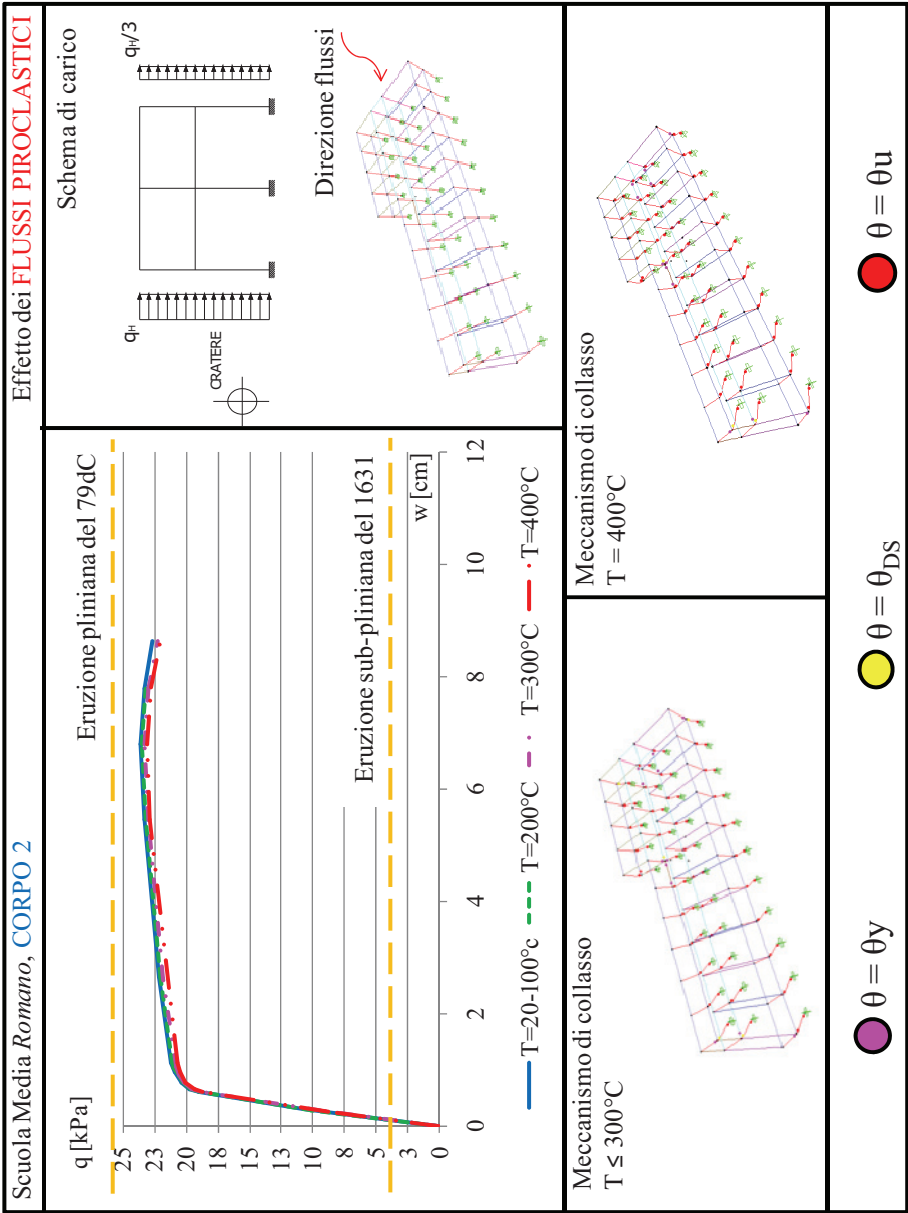


Figura 6. 38. Scuola media *Romano*, corpo 2. Effetto dei flussi piroclastici: curve push-over per carico orizzontale uniforme sulla facciata esposta al cratere, in funzione della temperatura dei clasti; meccanismi di collasso.

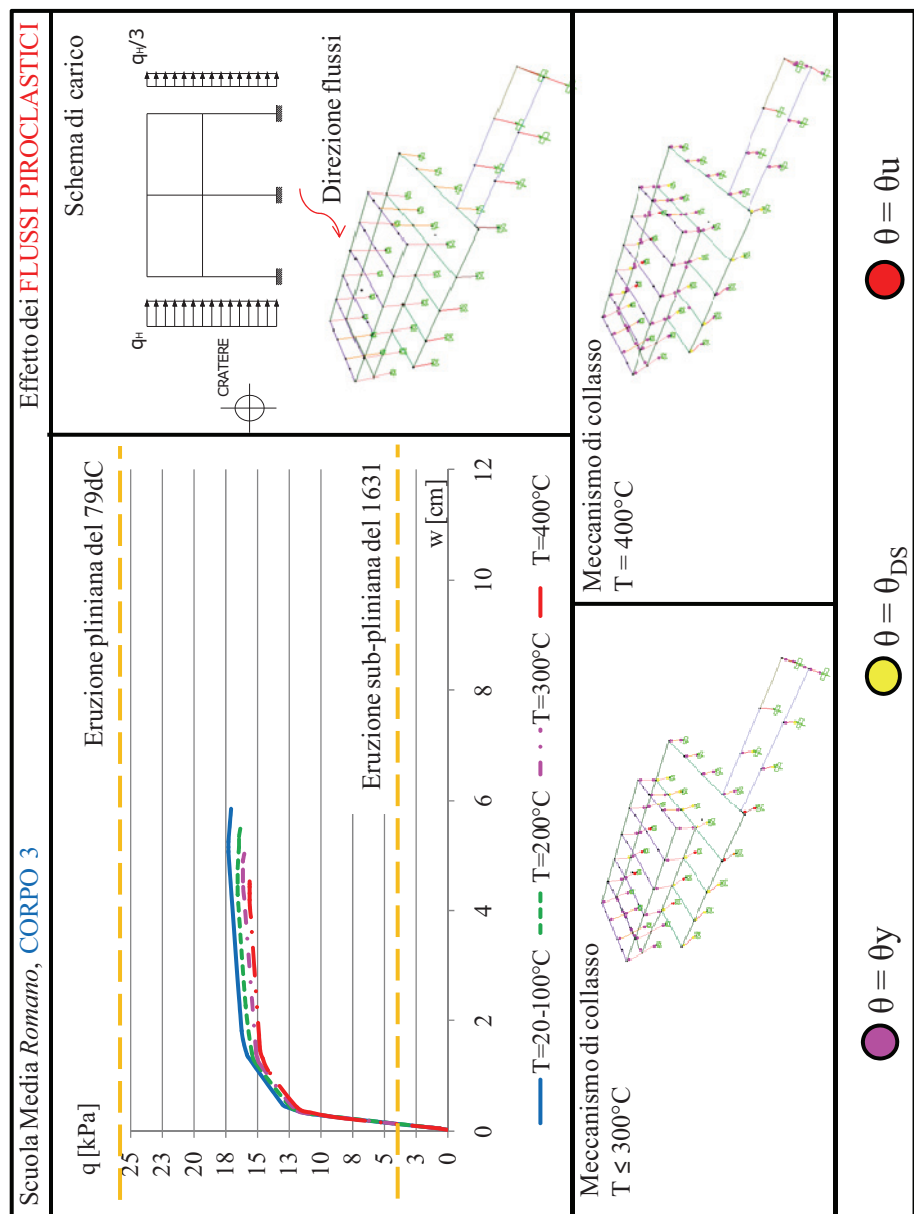


Figura 6. 39 Scuola media *Romano*, corpo 3. Effetto dei flussi piroclastici: curve push-over per carico orizzontale uniforme sulla facciata esposta al cratere, in funzione della temperatura dei clasti; meccanismi di collasso.

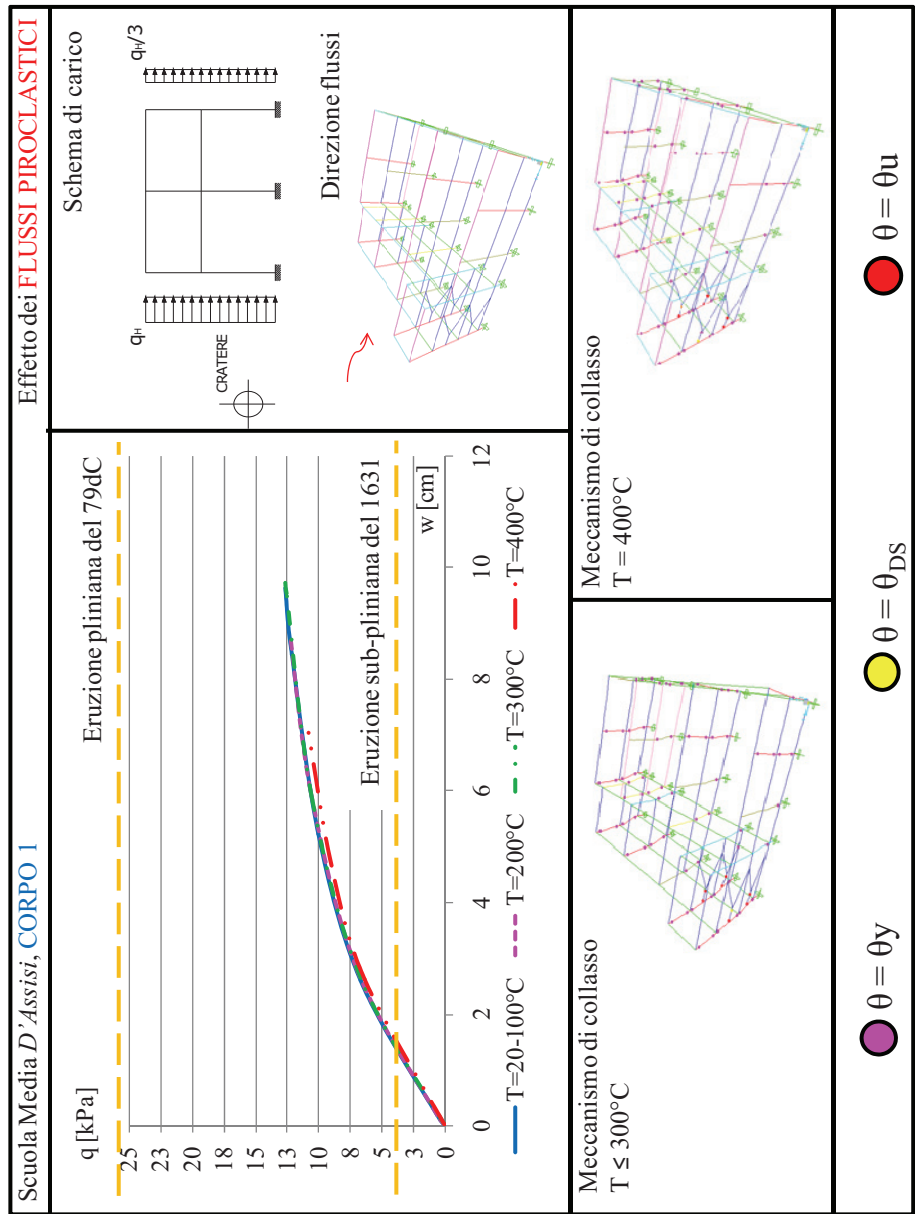


Figura 6. 40. Scuola media *D'Assisi*, corpo 1. Effetto dei flussi piroclastici: curve push-over per carico orizzontale uniforme sulla facciata esposta al cratere, in funzione della temperatura dei clasti; meccanismi di collasso.

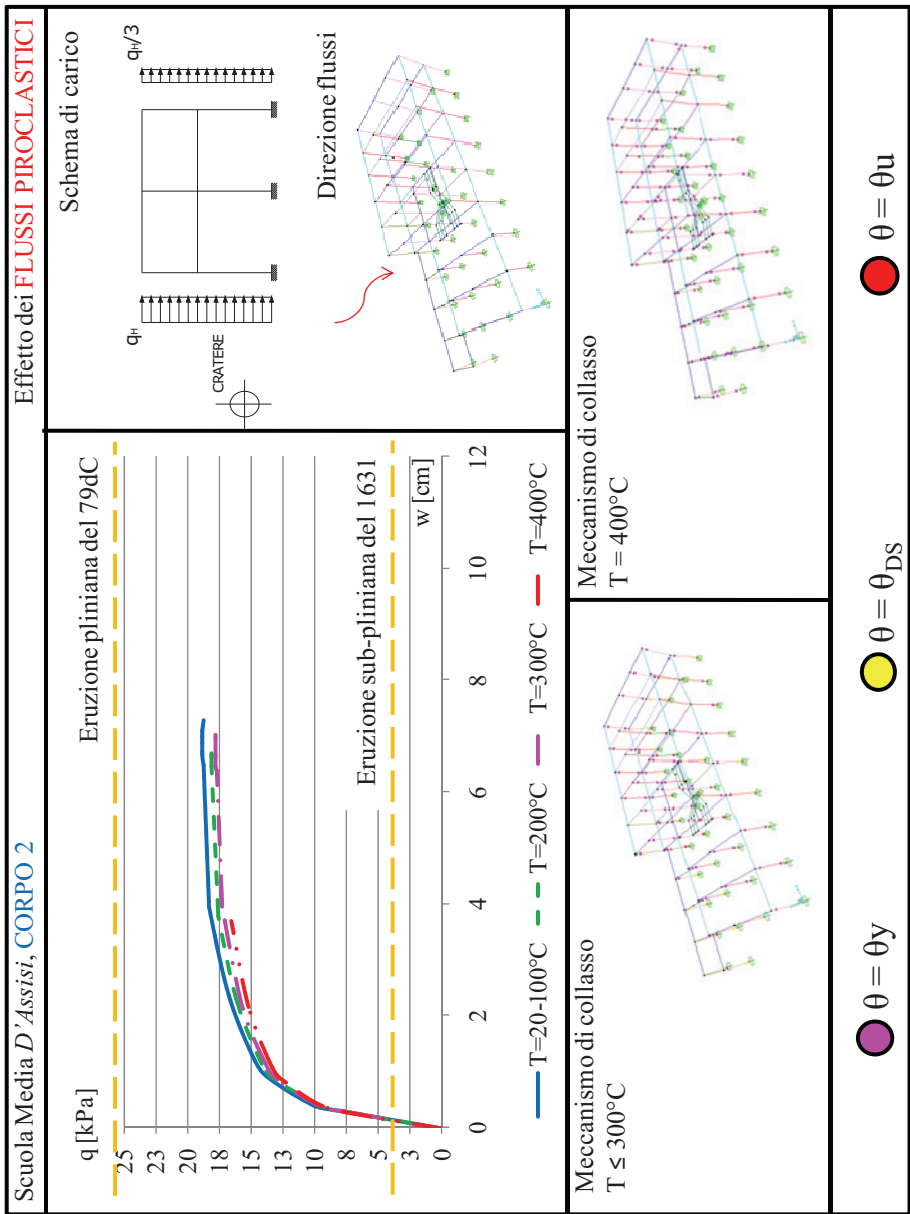


Figura 6. 41. Scuola media *D'Assisi*, corpo 2. Effetto dei flussi piroclastici: curve push-over per carico orizzontale uniforme sulla facciata esposta al cratere, in funzione della temperatura dei clasti; meccanismi di collasso.

6.3. STRUTTURE MURARIE

Il comportamento delle strutture in muratura investite da un flusso piroclastico sono state investigate da Spence et al. (2004b) con riferimento alle tipologie costruttive più diffuse in area vesuviana. In particolare, sulla base di semplici modelli analitici e di prove sperimentali sono stati forniti i valori di resistenza nei confronti delle pressioni indotte da un flusso indicate in Tabella 6.4.

Tabella 6. 4. Resistenza degli elementi murari vesuviani nei riguardi dei flussi piroclastici (Spence et al., 2004b).

Elemento	Resistenza [kPa]
Parete in tufo spessa 40cm	6.8-9
Parete in tufo spessa 60cm	10-13
Parete in pietra lavica spessa 60cm	20-26

Kiyono et al. (2006), invece, hanno esaminato il comportamento delle costruzioni in muratura modellando l'intera struttura (pareti, orizzontamenti e copertura) attraverso i *Distinct Element Methods* (DEM).

La DEM è una tecnica di analisi numerica 2D, che prevede una modellazione della struttura in elementi distinti, considerati rigidi, collegati da molle e dissipatori viscosi virtuali nei punti di contatto. Risolvendo l'equazione del moto per ogni elemento, step by step, è determinato il comportamento della combinazione di tutti gli elementi.

Il modello assunto è costituito da una struttura in muratura non armata larga 5,00m e con altezza d'interpiano pari 2,70m (Figura 6.42). La parete muraria è costituita da blocchi in cemento 15x20cm, con una densità di $1,50 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$, gli orizzontamenti sono schematizzate da lastre di calcestruzzo (densità $2,40 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$). La copertura ed il mobilio sono in legno di cipresso (densità $0,34 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$ per la copertura; $0,17 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$ per i mobili).

In particolare, sono stati considerati quattro possibili schemi della struttura (Figure 6.43): ad uno o due piani, con o senza mobilio.

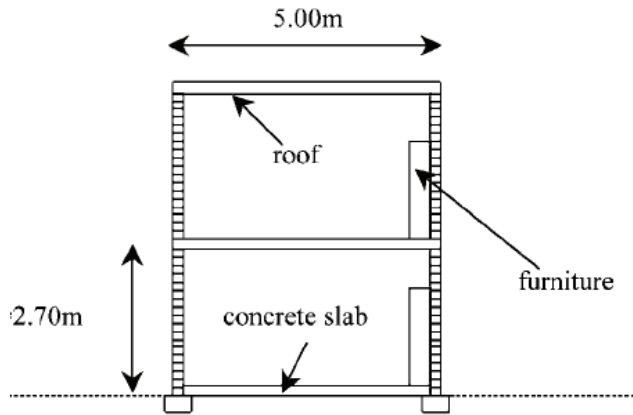


Figura 6. 42. Modello strutturale (Kiyono et al., 2006).

Il comportamento dinamico per effetto dei flussi piroclastici è fortemente influenzato dalla resistenza f_m della malta, assunta uguale in direzione normale e tangenziale, dunque, si sono considerati due casi: assenza di malta, vale a dire, resistenza per solo attrito ($f_m=0$); malta molto debole ($f_m=0,1 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$); e malta debole ($f_m=1 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$).

Si sono assunte solo malte più deboli perché se tutte le connessioni sono sufficientemente forti da sopportare il flusso piroclastico, la struttura non crolla. Superata, invece, la soglia di resistenza delle articolazioni, il giunto molla si rompe e la pressione dei flussi si ripartisce tra la superficie muraria e l'attrito tra i blocchi.

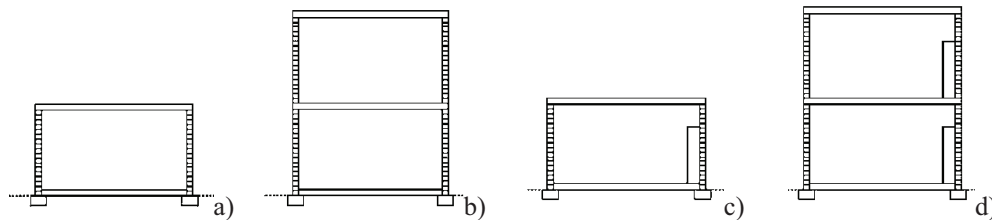


Figura 6. 43. Casi studio: a) muratura mono- piano senza mobilio; b) muratura a due piani senza mobilio; c) muratura mono- piano con mobilio; d) muratura a due piani con mobilio.

Quale time history della pressione dinamica indotta dai flussi piroclastici, Kiyono et al. (2006) hanno assunto la seguente distribuzione:

$$p(t) = A (t/t_p) \exp(1-t/t_p) \quad (6.6)$$

dove: A è il picco di pressione e t_p è il relativo istante di tempo. In questo studio, si è assunto $A = 0,1-1-5-10\text{kPa}$, $t_p = 2\text{s}$, e la pressione agisce secondo una distribuzione uniforme lungo la parete di destra (Figura 6.44)

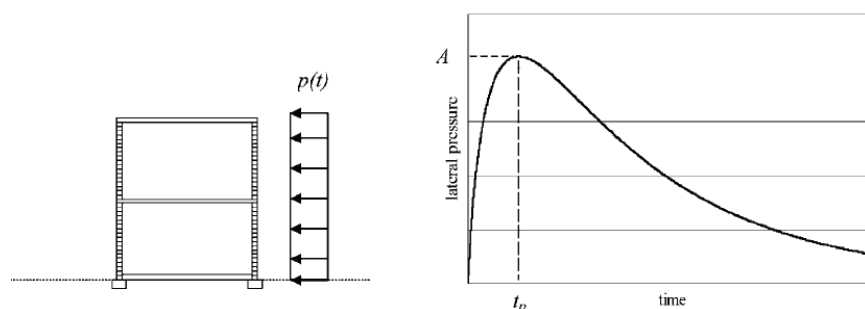


Figura 6. 44. Time history della pressione laterale assunta dal flusso.

Le analisi condotte portano ai seguenti risultati (Figura 6.45):

- le strutture non crollano per una pressione laterale di $0,1\text{kPa}$, anche se in assenza di malta;
- le strutture collassano per pressioni superiori a $0,1\text{kPa}$;
- la modalità di collasso del secondo piano dipende dalla resistenza delle connessioni. Infatti, per articolazioni più resistenti esso mantiene la sua forma originale;
- le modalità di collasso degli edifici ad uno o due piani sono quasi le stesse;
- la presenza di mobili influenza debolmente le modalità di collasso;
- il collasso è imputabile al ribaltamento dovuto al momento agente prodotto dai flussi che supera quello resistente offerto dalla struttura.

In sintesi, i risultati ottenuti forniscono, per le strutture in muratura, un valore critico delle pressioni dinamiche indotte dai flussi pari a 1kPa . Questo numero è ovviamente più piccolo delle resistenze determinate da Spence et al. (2006b), per due motivi: il primo è imputabile alla minore sezione della muratura; il secondo alle malte di scarsa qualità assunte.

Nessuno dei due approcci, comunque, prende in considerazione l'effetto delle temperature dei clasti. Ciò dà spunto a futuri argomenti di ricerca da investigare.

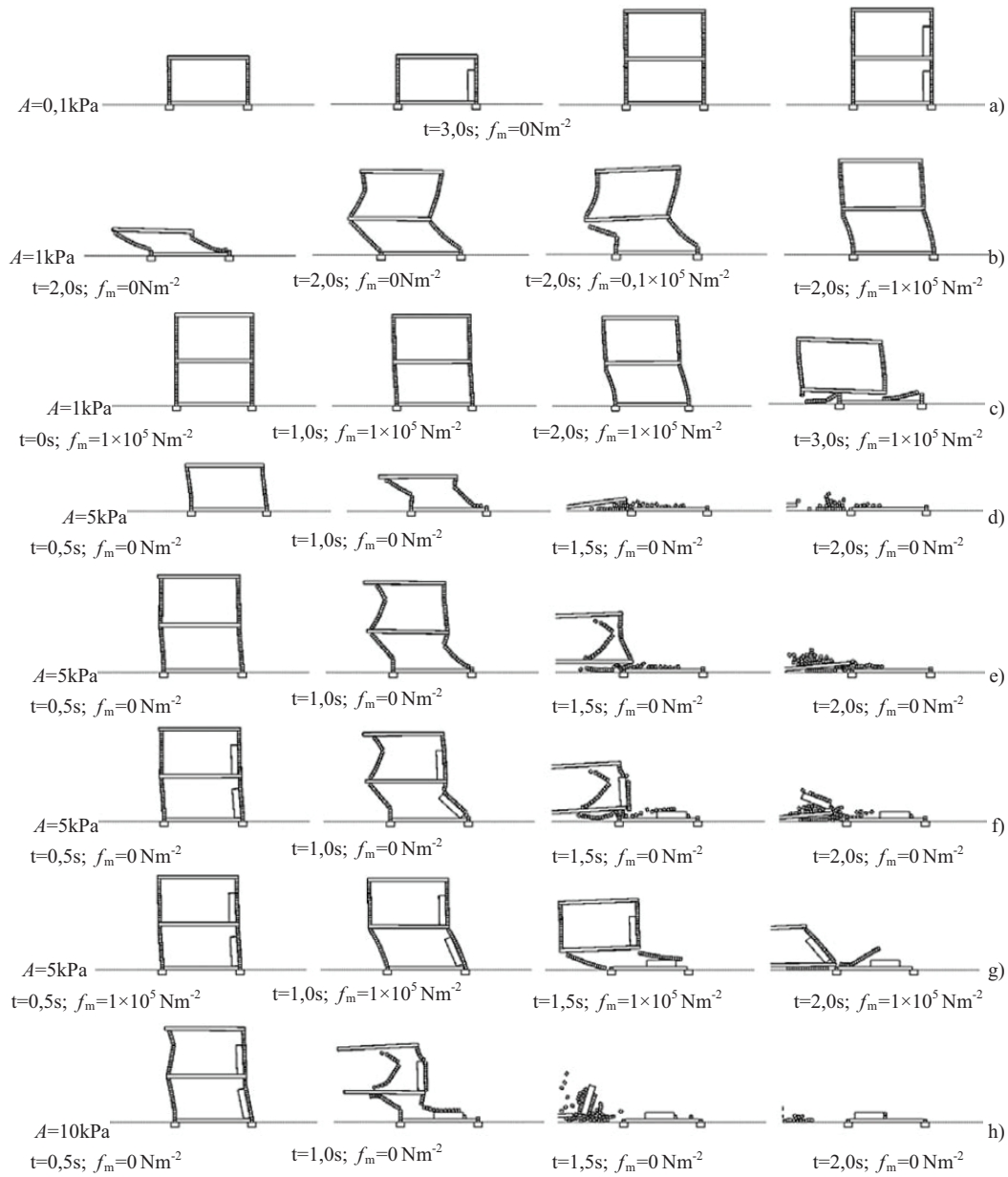


Figura 6. 45. Comportamento di strutture murarie ad 1 o 2 piani, con riferimento ad una resistenza f_m della malta pari 0 e 0.1×10^5 e $1 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, per valori della pressione pari a 0,1 (a), 1 (b,c), 5(d-g) e 10 (h) kPa (Kiyono et al., 2006).

6.4. COPERTURE

Casi studio

L'elemento costruttivo più sensibile ai depositi da caduta è costituito dalle coperture. Di seguito se ne analizza il comportamento, con riferimento alle tipologie più diffuse in area vesuviana (De Gregorio et al., 2010a).

L'effetto dei depositi piroclastici è valutato con riferimento a due aspetti. Il primo consiste nella determinazione del sovraccarico verticale di rottura che la struttura è in grado di sostenere. In particolare, lo studio è esteso a tetti con diverse geometrie e differenti carichi accidentali di progetto ($0,6$ e $2,0 \text{ kNm}^{-2}$). Il secondo aspetto riguarda l'analisi termica delle coperture, in considerazione del degrado termico delle caratteristiche meccaniche dei materiali. Infine, i risultati vengono combinati per fornire il massimo tempo di collasso per ciascuna tipologia, in relazione a diversi spessori dei clasti.

Nello specifico, le tipologie di coperture esaminate sono: tetti in legno ventilati e non, tetti con putrelle metalliche e tavelloni e tetti latero- cementizi. Le relative geometrie sono indicate in Figura 6.46.

Lo schema statico assunto è quello di semplice trave su due appoggi sottoposta ai carichi propri e permanenti g e ad un carico accidentale q_R prodotto dai depositi da caduta (Figura 6.47). Il degrado termico dei materiali è assegnato come uniformemente distribuito all'interno della sezione trasversale, in accordo con le indicazioni degli Eurocodici 2, 3 e 5, parti 1.2, con riferimento a quattro temperature, (20 , 200 , 300 e 400°C). In totale, sono stati analizzati 880 schemi per le coperture in legno, 1440 per quelle in acciaio e 5.440 per quelle latero- cementizie.

Le analisi termiche sono state condotte con il programma di calcolo ABAQUS v. 6,5. Il modello agli elementi finiti di una porzione di tetto ($1.6\text{m} \times 1.0\text{m}$) è stato implementato (Figura 6.48), assumendo un interasse di 80cm e travi alte: 16cm per le coperture in legno e in acciaio, e 12cm per quelle latero- cementizie. Per i diversi strati (pavimento, impermeabilizzante, massetto, ecc.) sono state assegnate specifiche proprietà termiche (densità, conducibilità e calore specifico) e sono stati modellati come elementi 3D per il trasferimento di calore.

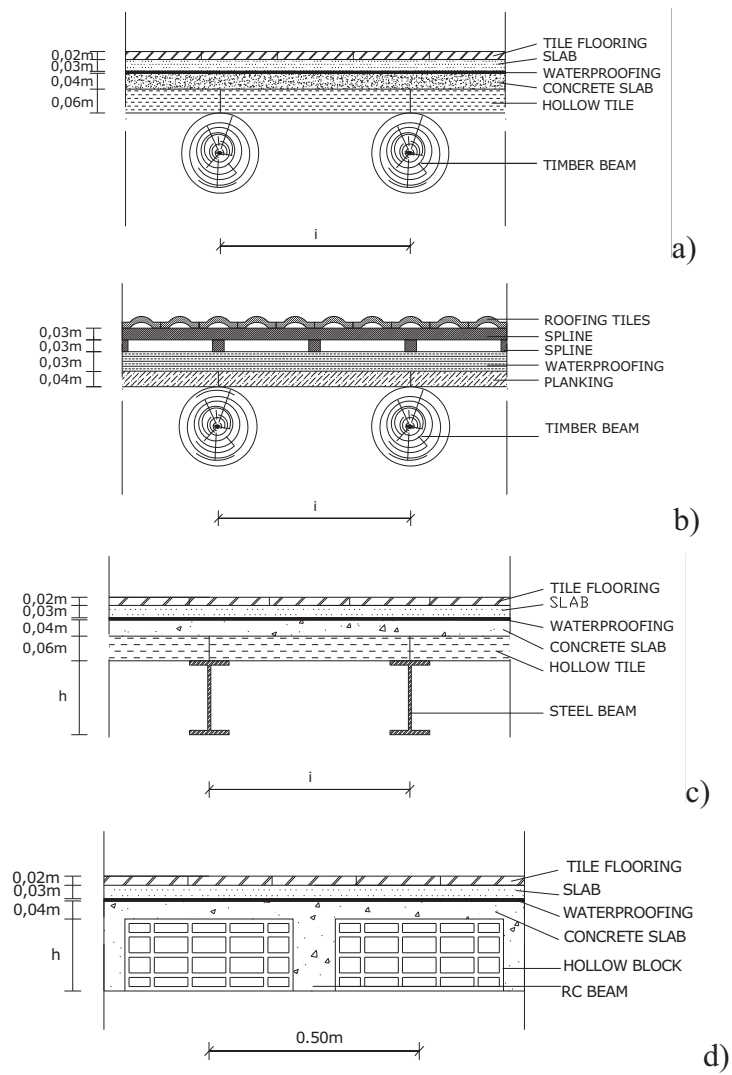


Figura 6. 46. Sezioni delle tipologie di coperture esaminate: a) legno; b) legno non ventilata; c) acciaio; d) latero-cementizia.

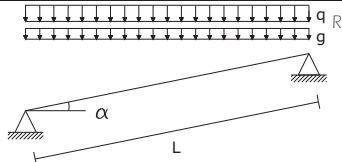
		Luci: $L = 3, 4, 5, 6, 7\text{m}$ Angolo inclin. falda: $\alpha = 0, 20, 30, 45^\circ$	
Interasse:	<ul style="list-style-type: none"> travi in legno e acciaio: travi in c.a.: 	$i = 0.80, 1.00\text{m}$ $i = 0.50\text{m}$	
DIMENSIONI DELLE TRAVI			
Legno		Acciaio	c.a.
(castagno)		FeB360	
Circolare (ϕ)	Rettangolare (BxH)	IPE	
[cm]	[cm]		
10	12x20	100	Materiali, altezze delle travi e armature variabili in accordo con le differenti normative tecniche italiane (RD 1939, DM 1972, DM 1996 and DM 2008), in funzione di due carichi accidentali di progetto pari a 0.6 e 2.0kNm ⁻² .
12	12x24	120	
14	12x26	140	
16	14x20	160	
18	16x20	180	
20	16x22	200	
22	16x24	220	
24	18x22	240	
26	18x24	270	
28	20x24		
30	20x26		

Figura 6. 47. Schema statico e caratteristiche geometriche delle coperture analizzate.

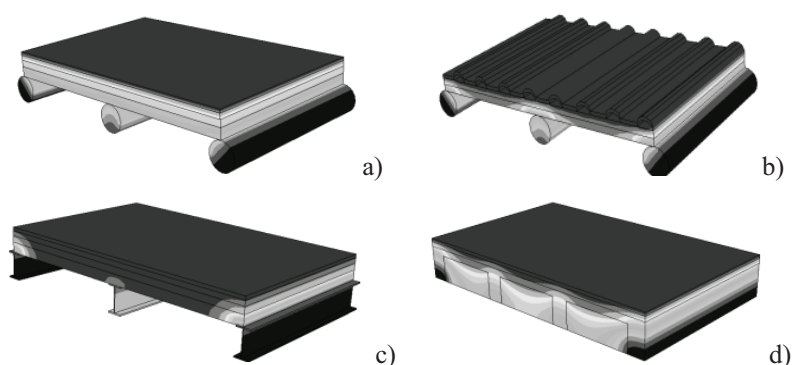


Figura 6. 48. Porzioni di coperture assunte nelle analisi termiche: a) tetto in legno; b) tetto in legno ventilato; c) tetto con travi in acciaio; d) tetto latero-cementizio.

Carico verticale ultimo residuo

Per ciascuna tipologia tetto in esame, è stato determinato il carico ultimo residuo q , in funzione di diversi angoli α di inclinazione della falda ($0-45^\circ$) temperature T ($20-400^\circ\text{C}$). In particolare, con riferimento ai tetti in legno, come temperatura massima si è assunto il valore di 100°C , oltre il quale il materiale offre resistenze trascurabili. Per ragioni di brevità, in Tabella 6.5 sono indicati i ranges dei carichi q determinati al variare della geometria.

Tabella 6. 5. Ranges dei carichi ultimi residui q (kNm^{-2})
per ciascuna tipologia di copertura analizzata (Figura 6.47),
al variare dell'angolo di inclinazione della falda α delle temperature T .

		$\alpha=0^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$
T=20-100°C					
Legno (ventilato)	Circolare	0.6-3.4	0.7-3.7	0.8-4.0	0.9-4.9
	Rettangol.	0.7-5.2	0.8-5.6	0.9-6.0	1.1-7.4
Legno (Non Vent.)	Circolare	0.6-2.8	0.7-3.0	0.8-3.2	0.9-4.0
	Rettangol.	0.6-7.6	0.7-8.1	0.8-8.8	0.9-10.8
Acciaio	IPE	1.2-5.1	1.3-5.5	1.4-5.9	1.8-7.3
C.A.	RD 1939	0.8-2.6	0.8-2.7	0.9-3.0	1.1-3.6
	DM 1972	0.9-2.2	0.9-2.3	1.0-2.5	1.2-3.1
	DM 1996	0.9-2.4	1.1-2.6	1.1-2.8	1.3-3.4
	NTC2008	1.1-3.1	1.1-3.3	1.2-3.6	1.5-4.4
T=200°C					
Acciaio	IPE	0.8-4.4	0.9-4.7	0.9-5.1	1.2-6.3
C.A.	RD 1939	0.1-1.6	0.1-1.7	0.1-1.9	0.2-2.3
	DM 1972	0.2-1.3	0.2-1.4	0.2-1.5	0.2-1.9
	DM 1996	0.3-1.6	0.3-1.7	0.4-1.8	0.5-2.2
	NTC2008	0.4-2.5	0.4-2.5	0.5-2.8	0.6-3.3
T=300°C					
Acciaio	IPE	0.4-3.8	0.4-4.0	0.5-4.3	0.6-5.3
C.A.	RD 1939	0.0-0.9	0.0-0.9	0.0-1.0	0.0-1.2
	DM 1972	0.0-0.6	0.0-0.7	0.0-0.7	0.0-0.9
	DM 1996	0.0-0.8	0.0-0.9	0.0-0.9	0.0-1.2
	NTC2008	0.0-1.5	0.0-1.6	0.0-1.8	0.0-2.2
T=400°C					
Acciaio	IPE	0.0-3.1	0.0-3.3	0.0-3.6	0.1-4.4
C.A.	RD 1939	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.2
	DM 1972	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
	DM 1996	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.1	0.0-0.2
	NTC2008	0.0-0.7	0.0-0.8	0.0-0.8	0.0-1.0

In Figura 6.49, con riferimento alle coperture in acciaio (tipologia più diffusa in area vesuviana), sono indicati i diagrammi di q al variare della geometria delle sezioni e della luce L . Le curve si riferiscono a due specifici casi: temperatura compresa tra 20 e 100°C e angolo d' inclinazione α variabile (Figura 6.49a); e coperture piane ($\alpha=0^\circ$) temperatura variabile (Figura 6.49b).

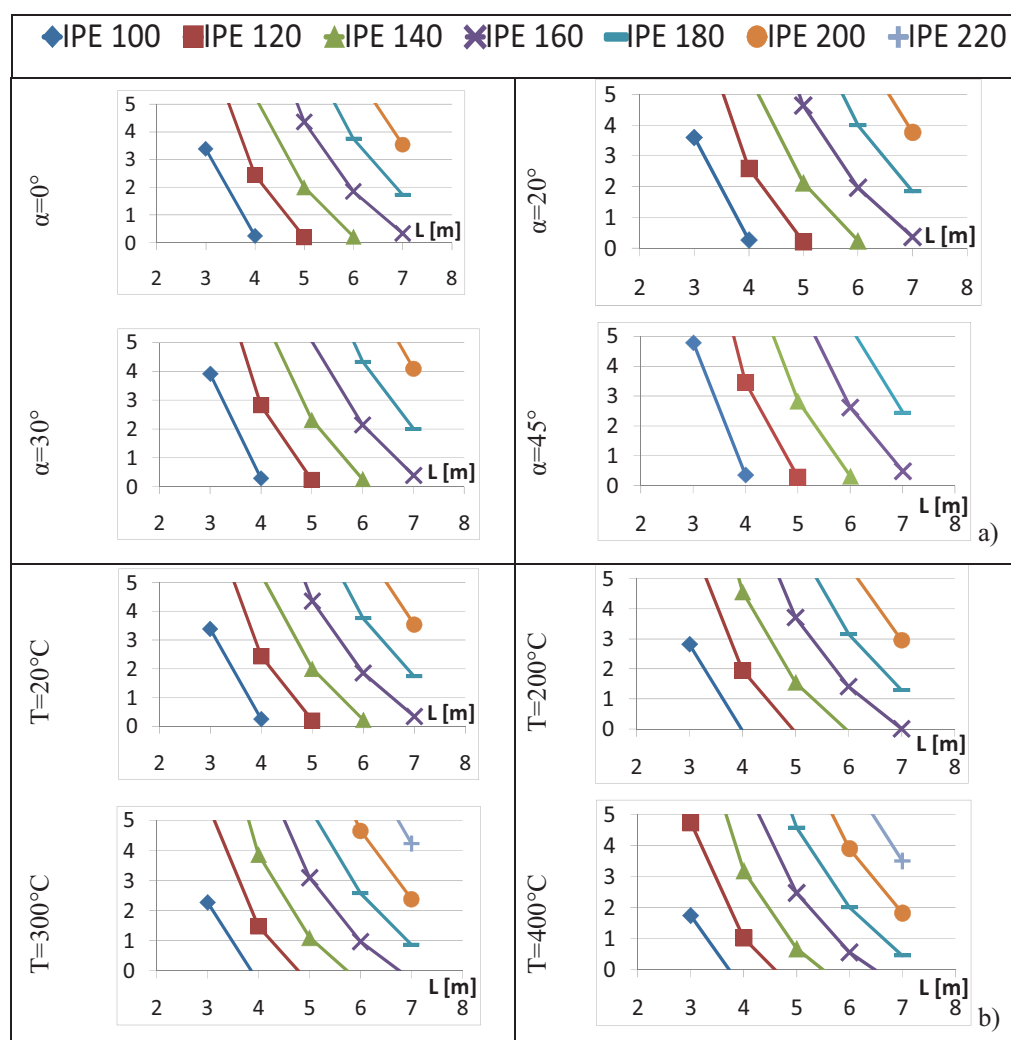


Figura 6. 49. Carico ultimo residuo q vs. luce L , per coperture in acciaio con interasse i pari ad 1,00m: a) per $T=20^\circ\text{C}$ al variare dell'angolo di inclinazione della falda α ; b) per $\alpha=0^\circ$ al variare di T .

I risultati mostrano che il carico ultimo residuo q esibisce un incremento di circa il 30-40% al variare dell'angolo di inclinazione della falda α da 0 a 45°. A contrario, le alte temperature producono una diminuzione del carico verticale di collasso, a causa del degrado termico dei materiali, pari mediamente al 30% a 200°C ed al 50% a 300°C. Quando la temperatura dei clasti raggiunge i 400°C, per la maggior parte delle sezioni considerate il sovraccarico sostenibile è trascurabile e, in alcuni casi, il collasso si verifica già in presenza del solo carico permanente.

Analisi termiche

Per ciascuna tipologia considerata, si è determinato il tempo necessario al raggiungimento della temperatura critica T_{CR} all'intradosso della copertura, partendo da una temperatura dei clasti all'estradosso pari a 400°C. In particolare, per le travi in legno T_{CR} è uguale a 100 ° C, mentre per quelle in acciaio e c.a. è pari alla massima raggiungibile, ossia 400 ° C.

Allo scopo di incrementare il tempo di trasferimento del calore dall'estradosso all'intradosso, si è considerata anche la presenza di un isolante termico, costituito da uno strato di lana di roccia spesso 3cm, con una conducibilità termica pari a 0,04 Wm⁻¹K⁻¹, notevolmente più piccole di quelle del legno (0,1204 Wm⁻¹K⁻¹), dell'acciaio (53,3004 Wm⁻¹K⁻¹) e del calcestruzzo (1,9104 Wm⁻¹K⁻¹).

I tempi di raggiungimento della temperatura critica T_{CR} sono indicati in Tabella 6.6, mentre le relative curve temperatura-tempo (T-t) sono illustrate in Figura 6.50. Esse mostrano l'andamento temporale delle temperature per le coperture in legno (a), in legno ventilato (b), in acciaio (c) e in c.a. (d), con o senza isolante, con riferimento a due diversi punti di controllo: l'estradosso (A) e l'intradosso (B) della trave.

Tabella 6. 6. Tempi necessari al raggiungimento della temperatura critica T_{CR} , con all'estradosso un deposito di clasti a 400°C.

Tipologia di copertura	T_{CR} °C	Senza isolante		Con isolante	
		min		min	
		A	B	A	B
Legno	100	90	180	190	430
Legno ventilato	100	50	120	120	300
Acciaio	400	2000		6200	
c.a.	400	2900		12950	

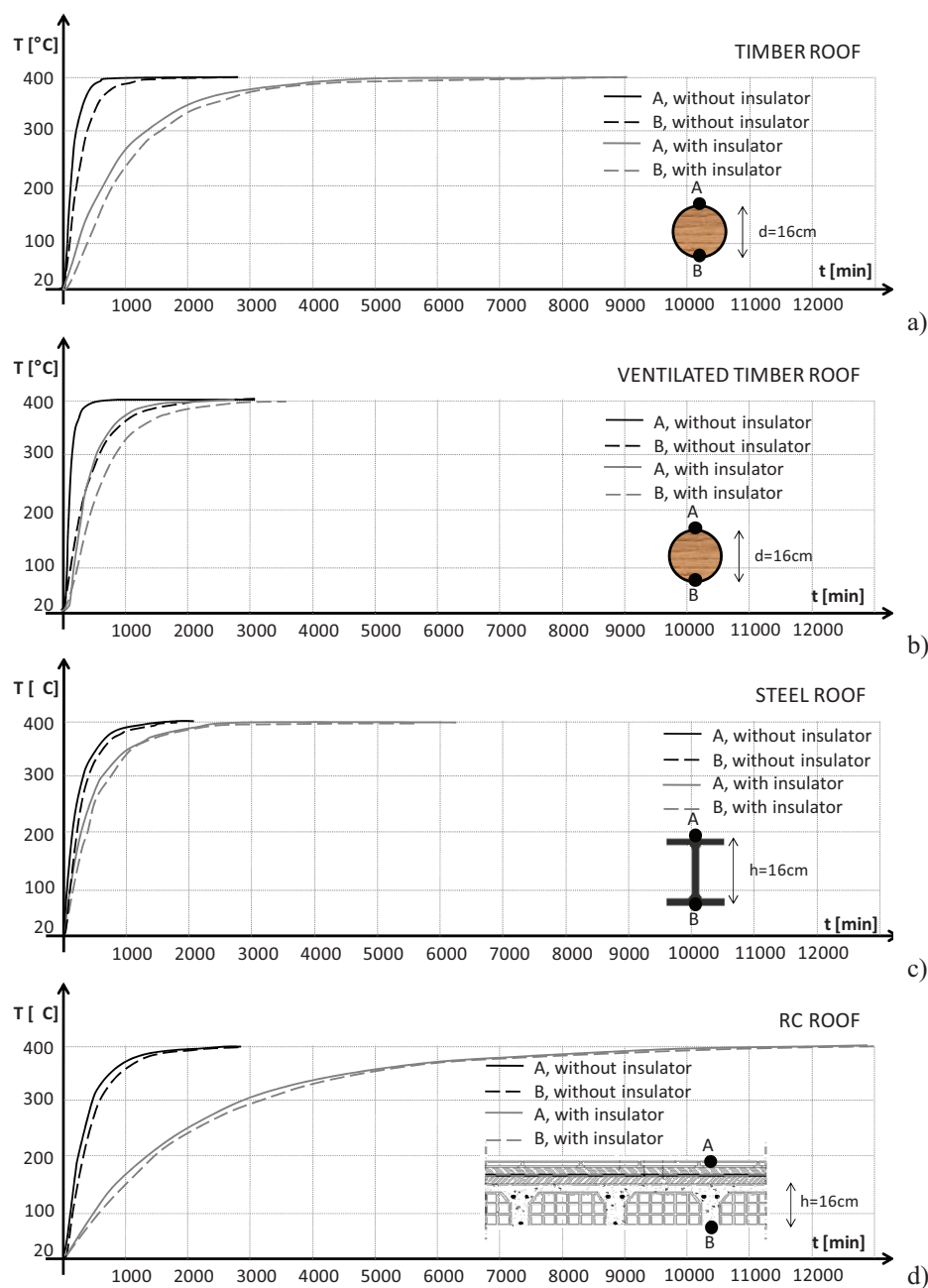


Figura 6. 50. Curve temperatura- tempo (T-t) per coperture: a) in legno; b) in legno ventilato; c) in acciaio; d) in c.a.

I risultati, oltre ad evidenziare i benefici dello strato isolante, specie per i tetti in c.a., dimostrano che, nei casi dell'acciaio (c) e del c.a. (d), le curve relative ai punti A e B sono quasi sovrapposte. Quindi, i tempi relativi al raggiungimento della temperatura critica (Tabella 6.6) possono essere adottati per travi di qualsiasi altezza. Al contrario, nel caso del legno, a causa dell'inerzia termica del materiale, nello stesso istante, le temperature all'estradosso ed all'intradosso sono differenti. Ad esempio, con riferimento alle travi in legno con un diametro di 16cm ($\phi 16$), quando la temperatura raggiunta in B (TB) è pari a 100°C, quella in A (TA) è di 50°C. Inoltre, tenendo conto dell'effetto del manto di copertura (pavimento, massetto, impermeabilizzante, isolante, ecc) e ipotizzando un trend lineare delle curve T-t fino alla temperatura critica (100°C), le velocità di trasmissione del calore nelle travi in legno $\phi 16$ sono le seguenti:

- 1.77mm/min per tetti in legno senza isolante;
- 0.67mm/min per tetti in legno con isolante;
- 2.28mm/min per tetti in legno ventilato senza isolante;
- 0.88mm/min per tetti in legno ventilato con isolante.

Mappe di vulnerabilità

Con riferimento alle isopache dell'eruzione sub-pliniana del 1631, sono state redatte delle mappe di vulnerabilità (Figura 6.52-6.56). Esse si riferiscono al modello dell'azione da depositi piroclastici indicata nel par.3.3.2.

Al variare della distanza dal cratere, per tetti di luce media pari a 6m, interasse di 1m e normale esposizione ($C_E=1$), le mappe indicano i tempi di collasso prodotti da depositi di clasti con densità pari 1400kgm^{-3} , in funzione della tipologia delle coperture e delle relative sezioni, dello strato isolante e dell'angolo di inclinazione di falda α (0, 20, 30, 45°).

Lo schema di lettura delle mappe è indicato in Figura 6.51.





	NOT VENTILATED TIMBER ROOF	d	timber beam section diameter
	VENTILATED TIMBER ROOF	IPE	steel beam section
	STEEL ROOF	39	technical rule: R.D. '39
	RC ROOF	72	technical rule: M.D. '72
		96	technical rule: M.D. '96
		08	technical rule: NTC 2008
		A	design live load: $2,0\text{kNm}^{-2}$
		B	design live load: $0,6\text{kNm}^{-2}$
		t	collapse time

Figura 6. 51. Schema di lettura delle mappe di vulnerabilità delle Figure 6.52-56.

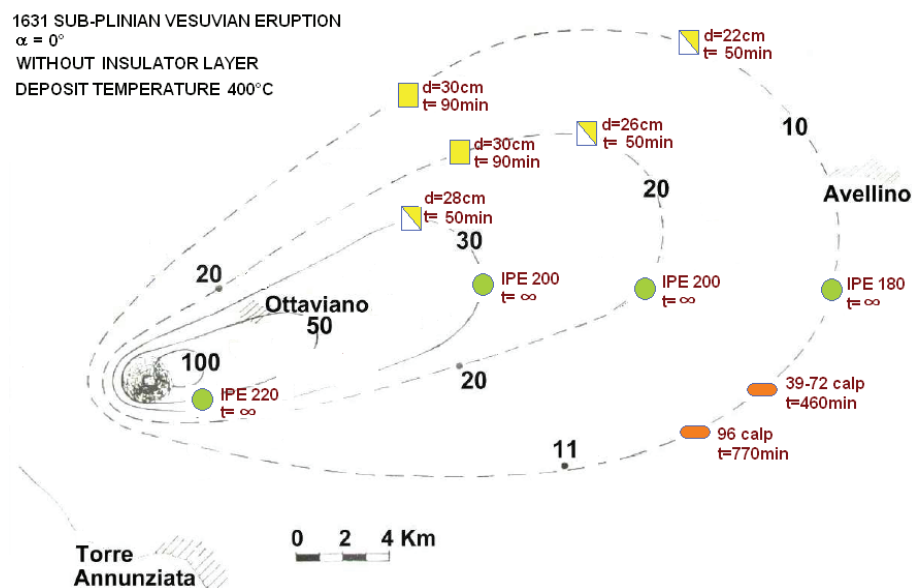


Figura 6. 52. Tempo di collasso prodotto dai depositi da caduta relative all'eruzione vesuviana del 1631, per coperture di luce pari a 6m, interasse di 1m, normale esposizione ($C_E=1$), $\alpha=0^\circ$ e assenza di isolante termico.

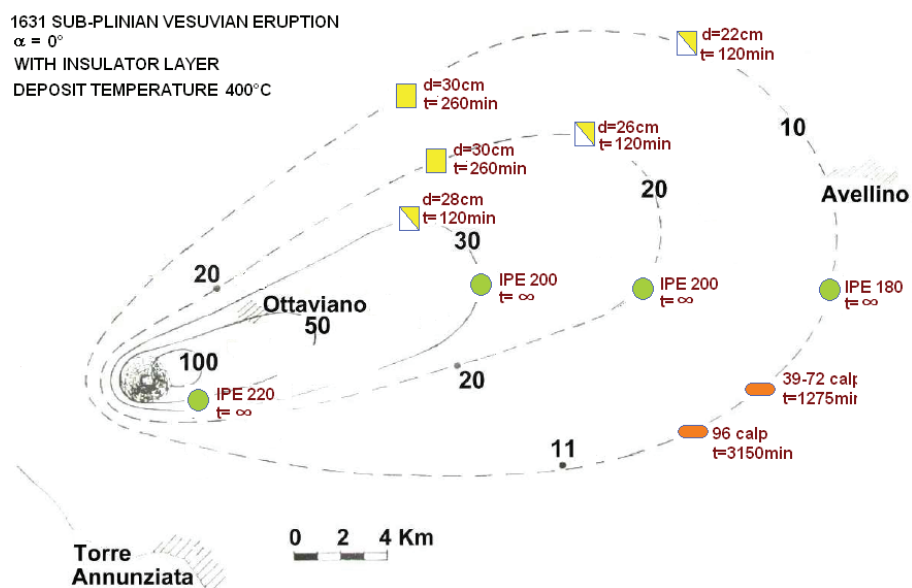


Figura 6. 53. Tempo di collasso prodotto dai depositi da caduta relative all'eruzione vesuviana del 1631, per coperture di luce pari a 6m, interasse di 1m, normale esposizione ($C_E=1$), $\alpha=0^\circ$ e presenza di isolante termico.

1631 SUB-PLINIAN VESUVIAN ERUPTION
 $\alpha = 20^\circ$
 WITH INSULATOR LAYER
 DEPOSIT TEMPERATURE 400°C

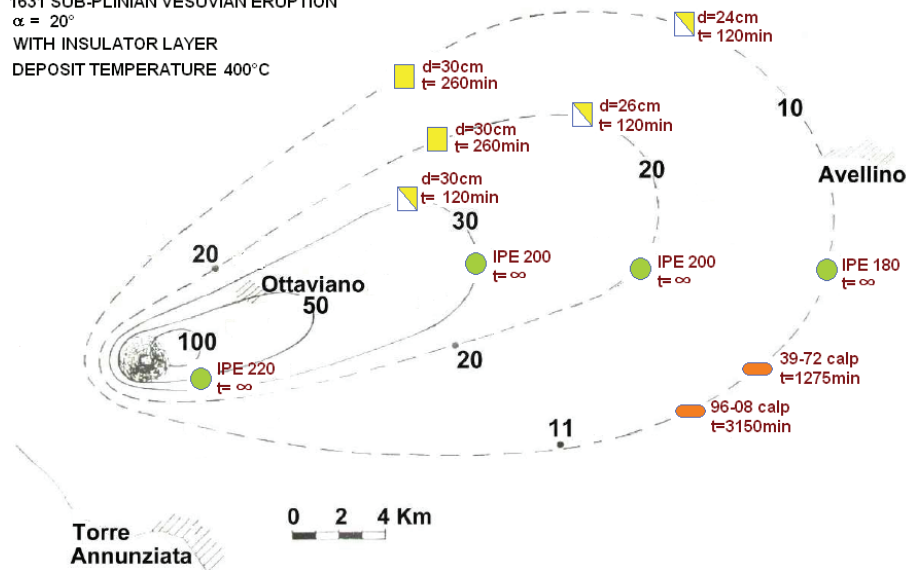


Figura 6. 54. Tempo di collasso prodotto dai depositi da caduta relative all'eruzione vesuviana del 1631, per coperture di luce pari a 6m , interasse di 1m , normale esposizione ($C_E=1$), $\alpha=20^\circ$ e presenza di isolante termico.

1631 SUB-PLINIAN VESUVIAN ERUPTION
 $\alpha = 30^\circ$
 WITH INSULATOR LAYER
 DEPOSIT TEMPERATURE 400°C

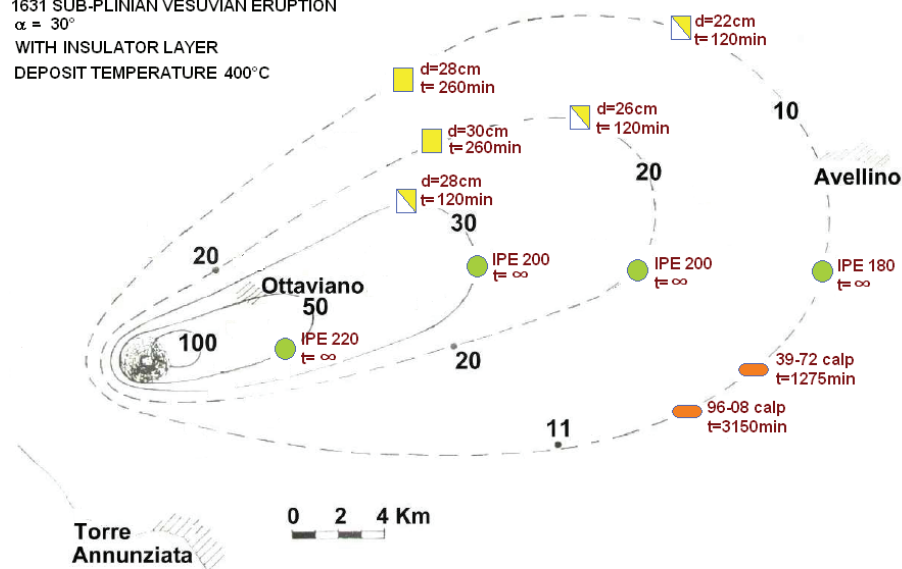


Figura 6. 55. Tempo di collasso prodotto dai depositi da caduta relative all'eruzione vesuviana del 1631, per coperture di luce pari a 6m , interasse di 1m , normale esposizione ($C_E=1$), $\alpha=30^\circ$ e presenza di isolante termico.

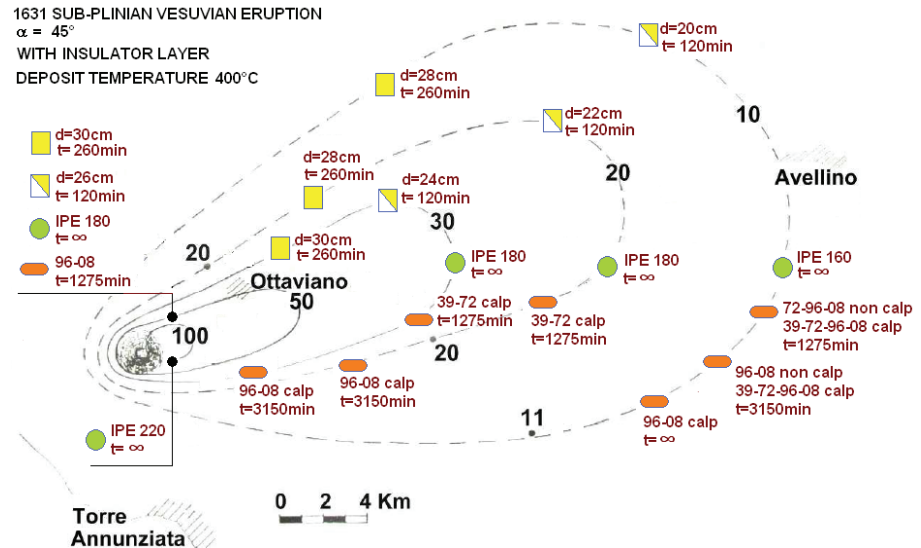


Figura 6. 56. Tempo di collasso prodotto dai depositi da caduta relative all'eruzione vesuviana del 1631, per coperture di luce pari a 6m, interasse di 1m, normale esposizione ($C_E=1$), $\alpha=45^\circ$ e presenza di isolante termico.

6.5. ELEMENTI DI CHIUSURA

Gli elementi più vulnerabili nei riguardi dei flussi piroclastici sono gli quelli di chiusura di un edificio, ossia tamponature e aperture.

Spence et al. (2004b), con riferimento alle tipologie più diffuse in area vesuviana, hanno condotto prove a carico di collasso sui seguenti elementi, allo scopo di valutarne la resistenza nei confronti dei flussi:

- finestre in alluminio ben mantenute;
- finestre in alluminio mal mantenute;
- vecchie finestre in legno;
- vecchie porte in legno;
- tamponature in laterizio forato senza aperture;
- tamponature in laterizio forate con aperture;
- tamponature in tufo.

Le prove sono state condotte senza tener conto dell'effetto temperatura, ma applicando semplicemente una pressione orizzontale dinamica a finestre, porte (Figura 6.57a) e tamponature (Figura 6.57b). In particolare, nel caso delle

pareti, il carico è stato applicato mediante una griglia in acciaio avente inerzia variabile per garantire una distribuzione uniforme della pressione sul muro. I risultati ottenuti, in termini di resistenza ultima, sono indicati in Tabella 6.7.



a)



b)

Figura 6. 57. Prove a carico di collasso condotte in area vesuviana per investigare il comportamento nei riguardi dei flussi piroclastici di: a) finestre e porte; b) tamponature (Spence et al., 2004b).

Tabella 6. 7. Resistenza degli elementi di chiusura vesuviani nei riguardi dei flussi piroclastici (Spence et al., 2004b).

Elemento	Resistenza [kPa]
Lastre di vetro ordinarie	<1.5
Finestre in alluminio in cattive condizioni	1.5
Finestre in alluminio in buone condizioni	3.0
Vecchie porte in legno	3.5
Muratura in tufo giallo (<40cm)	4.2 - 7.4
Vecchie finestre in legno	5.0
Tamponatura in laterizio forato senza aperture	5.5
Muratura in tufo giallo (lunghezza 4m; spessore 40cm)	6.8 – 9
Tamponatura in laterizio forato con aperture	7.6 – 8.9
Muratura in tufo giallo (lunghezza 4m; spessore 60cm)	10 – 13
Muratura in pietra vulcanica (lunghezza 4m; spessore 60cm)	20 - 26

Capitolo 7

Valutazione della vulnerabilità vulcanica in area vesuviana

7.1. METODOLOGIA EXPLORIS

7.1.1 *Centro storico di Torre del Greco*

La metodologia di valutazione della vulnerabilità vulcanica messa a punto all'interno del progetto EXPLORIS (par. 4.2) è stata applicata agli edifici del centro storico di Torre del Greco (Mazzolani et al., 2009c e 2010b).

Preliminarmente, sulla base dei dati raccolti attraverso la scheda PLINIVS (Tabella 4.5), sono state assegnate le classi di vulnerabilità in relazione al sisma (Tabella 4.2), ai depositi da caduta (Tabella 4.3) ed ai flussi piroclastici (Tabella 4.4). I risultati sono indicati nelle Figure 7.1-7.3.

La valutazione del danno, in termini di numero di edifici collassati o con finestre rotte, è stata condotta con riferimento ad un'eruzione sub-pliniana che si sviluppa secondo le seguenti fasi.

Prima dell'eruzione, tre eventi sismici discreti (EQ) si verificano con un'intensità di grado VI-VII-VIII (EMS, 1998), rispettivamente. Durante l'eruzione, è prevista una caduta di cenere (AF) continua, accompagnata da un evento EQ di intensità moderata (VI). Alla fine dell'eruzione, conclusasi la fase degli ash fall, si verifica una serie di tre eventi da flusso piroclastico (PF), con durate di due minuti ciascuno e distribuiti temporalmente in maniera casuale.

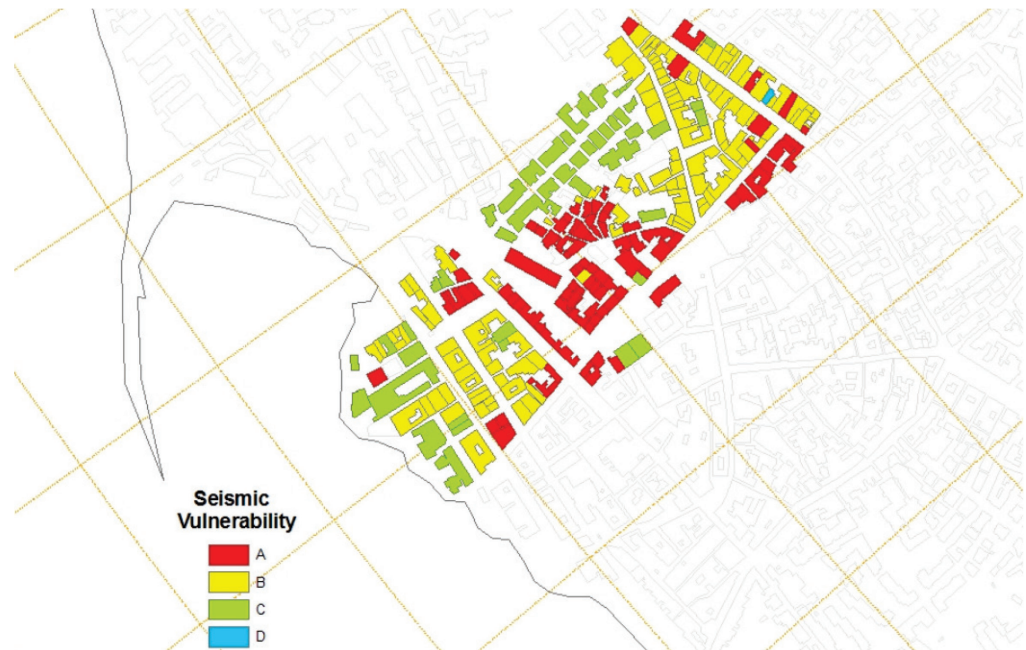


Figura 7. 1. Centro storico di Torre del Greco. Classi di vulnerabilità in relazione al sisma (Tabella 4.2).

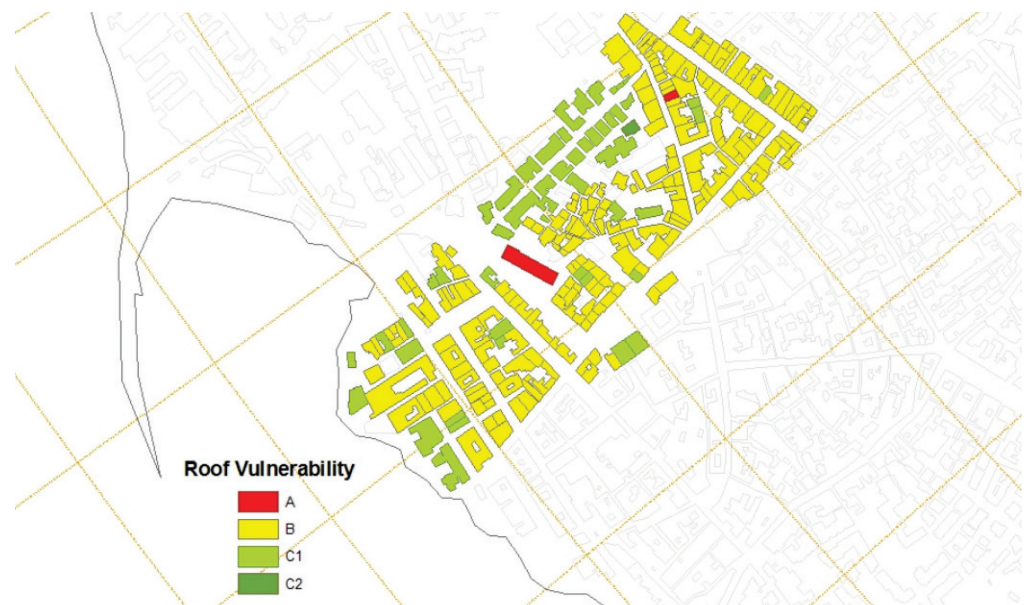


Figura 7. 2. Centro storico di Torre del Greco. Classi di vulnerabilità in relazione ai depositi da caduta (Tabella 4.3).

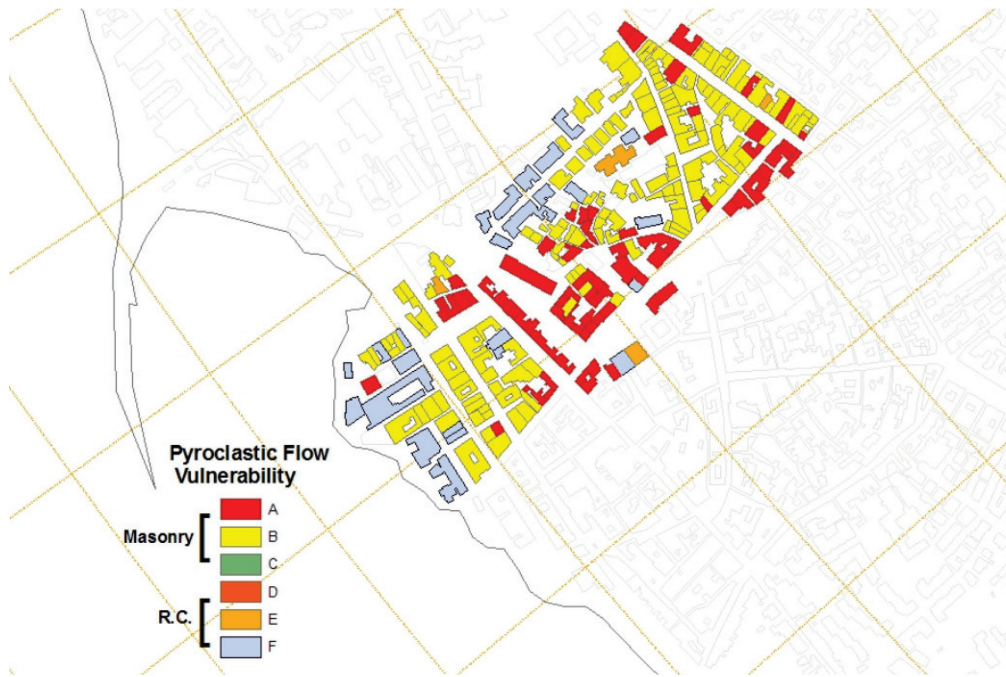


Figura 7.3. Centro storico di Torre del Greco. Classi di vulnerabilità in relazione ai flussi piroclastici (Tabella 4.4).

Gli effetti dei depositi da caduta sono fortemente dipendenti dalla direzione dei venti stratosferici durante l'eruzione. Il modello assunto in EXPLORIS assume 16 settori possibili per la direzione del vento prevalente (Macedonio et al., 2008), come illustrato in Figura 7.4. Nella presente applicazione, in accordo con quanto previsto nel Piano di Simulazione adottato dalla Protezione Civile per l'area vesuviana, sono stati assunti quattro diversi settori per la direzione del vento: i settori 10 e 11, in grado di causare danno maggiore nell'area in esame e i settori 8 e 9, responsabili di minori danni. Per ciascuno di questi settori, è stato simulato l'intero processo eruttivo.

Come illustrato nelle Figure 7.5-7.7, i risultati del modello di simulazione da impatto sono rappresentati in diverse mappe GIS, con l'indicazione dei danni agli edifici. De esse si evince la forte influenza della direzione del vento, tanto che con vento nei settori 10 e 11, tutti gli edifici risultano collassati prima di arrivare alla fase finale dell'eruzione (Figura 7.5 c,d). Dunque, l'influenza dei flussi piroclastici diventa rilevante solo quando il vento spira nelle direzioni 8 e 9 (Figure 7.6, 7.7).

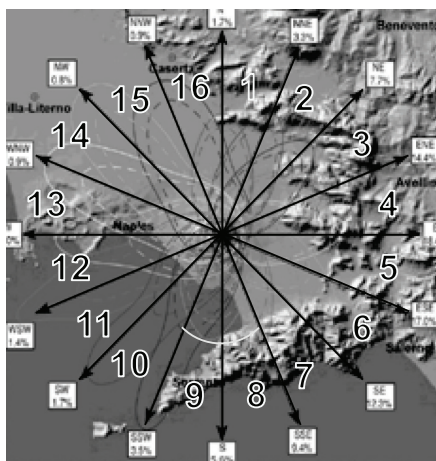


Figura 7. 4. Settori radiali rappresentativi di 16 differenti direzioni prevalenti del vento (Macedonio et al., 2008).

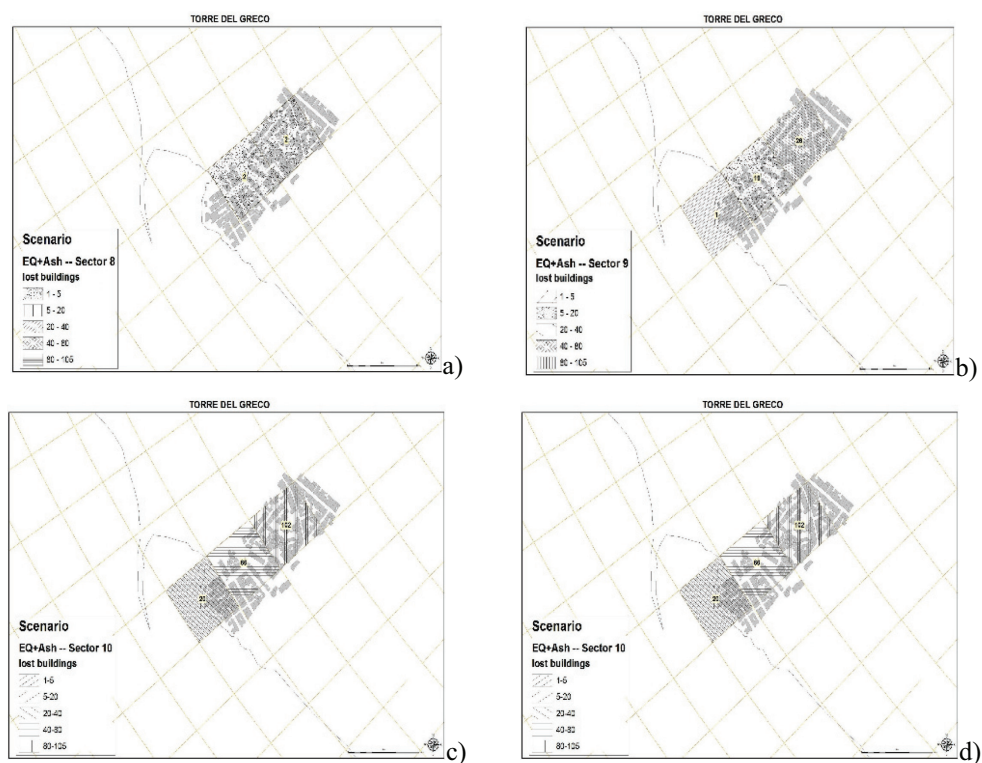


Figura 7. 5. Centro storico di Torre del Greco. Scenario di danno prodotto, in termini di numero di edificio crollati, per effetto del sisma e degli ash fall, durante l'eruzione, con direzione del vento nei settore 8 (a), 9 (b), 10 (c) e 11 (d).

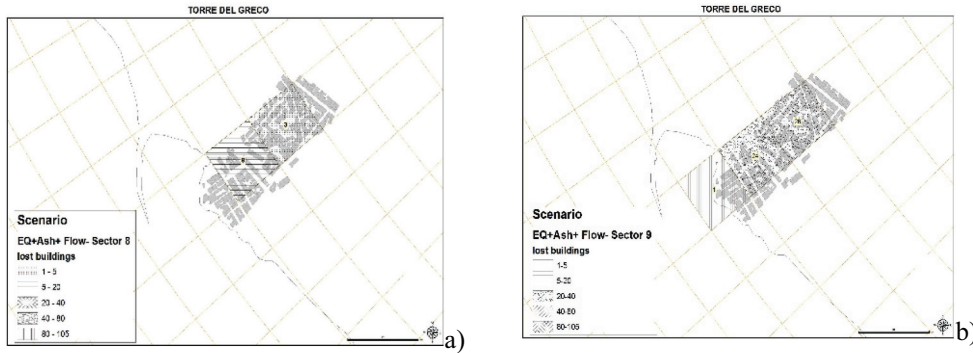


Figura 7. 6. Centro storico di Torre del Greco. Scenario di danno prodotto, in termini di numero di edificio crollati, per effetto del sisma, degli ash fall e dei flussi piroclastici, durante la fase finale dell'eruzione, con direzione del vento nei settore 8 (a) e 9 (b).

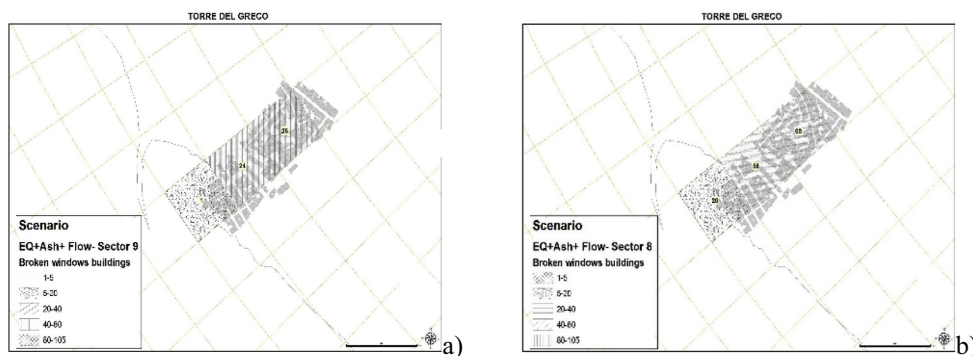


Figura 7. 7. Centro storico di Torre del Greco. Scenario di danno prodotto, in termini di numero di edificio con finestre rotte, per effetto del sisma, degli ash fall e dei flussi piroclastici, durante la fase finale dell'eruzione, con direzione del vento nei settore 8 (a) e 9 (b).

7.1.2 Area residenziale e scuole di Torre del Greco

La metodologia di valutazione della vulnerabilità vulcanica messa a punto all'interno del progetto EXPLORIS (par. 4.2) è stata applicata anche ai 54 edifici costituiti dalle costruzioni dell'area residenziale e delle scuole di Torre del Greco (Mazzolani et al., 2010b).

Preliminarmente, sulla base dei dati raccolti attraverso la scheda PLINIVS (Tabella 4.5), sono state assegnate le classi di vulnerabilità in relazione al

sisma (Tabella 4.2), ai depositi da caduta (Tabella 4.3) ed ai flussi piroclastici (Tabella 4.4). I risultati sono indicati in Tabella 7.1.

Tabella 7. 1. Area residenziale e scuole di Torre del Greco. Percentuali di distribuzioni delle classi di vulnerabilità relative al sisma (Tabella 4.2) , ai depositi da caduta (Tabella 4.3) e ai flussi piroclastici (Tabella 4.4).

SISMA	As		Bs		Cs		Ds	
	2		11		63		24	
DEPOSITI DA CADUTA	Ar		Br		C1r		C2r	
	2		7		48		43	
FLUSSI PIROCLASTICI	Ap		Bp		Cp		Dp	
	0		35		0		0	

In questo caso, la valutazione del danno è stata condotta con riferimento ad un'eruzione sub-pliniana che si sviluppa secondo due sole fasi.

La prima, precedente l'eruzione, è caratterizzata da due eventi sismici discreti (EQ) di grado VII e VIII (EMS, 1998). La seconda, coincidente con la fase propriamente eruttiva, è costituita da una caduta di cenere (AF) continua, con vento nei settori 8, 9, 10 e 11 (Figura 7.4) .

Per effetto dei due terremoti, i livelli di danno sono indicati in Tabella 7.2, con riferimento alla EMS'98 (D0 = nessun danno, D1 = danno luce, D2 = danno moderato, D3 = gravi danni in età, D4 = crollo parziale, D5 = collasso totale). Vista la bassa vulnerabilità sismica di questo gruppo di costruzioni, (Cs, Ds), il danno atteso risulta essere basso (D0-D3), mentre la caduta di cenere porta al collasso di molte strutture , specie quando il vento spira nella direzione dei settori 10 e 11 (Tabella 7.3).

Tabella 7. 2. Area residenziale e scuole di Torre del Greco. Danni prodotti da terremoti del VII e dell'VIII grado.

Azione	Edifici con danno di livello Di [n°]					
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
EQ (VII)	28	19	6	1	0	0
EQ (VIII)	23	20	9	2	0	0

Tabella 7. 3. Area residenziale e scuole di Torre del Greco. Edifici collassati per effetto dei depositi da caduta con vento in direzione 8, 9, 10, 11.

Settore vento	Azione	Edifici collassati [n°]
8	AF	38
9	AF	3
10	AF	53
11	AF	54

7.2. METODOLOGIA SPEDITIVA PROPOSTA

7.2.1 Complessi scolastici in c.a. di Torre del Greco

La metodologia speditiva proposta nel par.4.3.2 è stata applicata ai 7 edifici scolastici in c.a. di Torre del Greco. La presenza di giunti sismici ha consentito di scindere alcuni complessi scolastici in più corpi di fabbrica. La valutazione della loro vulnerabilità nei riguardi degli eventi sismici e vulcanici è riportata in Tabella 7.4.

L'indice di vulnerabilità sismico (I_{VS}) è stato valutato in accordo con le indicazioni della procedura GNDT di II livello (Angeletti e Gavarini, 1984), quello specifico delle azioni vulcaniche (I_{VV}) è stato stimato in accordo con i metodi multi- criterio AHP e Topsis, secondo i pesi dei criteri assegnati in Tabella 4.12, infine, quello di vulnerabilità vulcanica globale (I_{VV}) è stato determinato combinando i due precedenti indici secondo la relazione (4.15).

Gli indicatori a_{ij} delle matrici di decisione (Tabella 4.8), utilizzati per misurare la prestazione dell'alternativa i -esima rispetto al criterio j -esimo, sono scelti su basi diverse:

- ad alcuni criteri è stato associato direttamente il valore presente sulla scheda (n° piani; spessore strutture verticali e tamponature; n° finestre piccole, medie e grandi; orientamento facciata a rischio; distanza dal cratere; ecc.);
- ad alcuni criteri è stato associato il carico ultimo dell'elemento resistente (coperture e solai) o la tensione di rottura del materiale (strutture verticali e tamponature);
- ad alcuni criteri è stato associato un punteggio numerico corrispondente ad un giudizio verbale. Ad esempio: assente/basso (3), medio (6), alto (9) per il livello di progettazione antisismica; e

scadente (2), mediocre (5), buono (8), eccellente (10) per lo stato di conservazione della struttura;

- ad altri criteri è stato associato un numero coincidente con il peso ottenuto dalla riapplicazione del metodo AHP. Ad esempio manutenzione straordinaria (0,0006), miglioramento (0,0194), adeguamento (0,9798) nel caso degli interventi subiti dalla costruzione.

Tabella 7. 4. Scuole in c.a. di Torre del Greco. Indici di vulnerabilità sismico (I_{VS}), vulcanico (I'_{VV}) e vulcanico globale (I_{VV}).

SCUOLA	CORPI DI FABBRICA	I_{VS}	I'_{VV}	I_{VV}
S.M. Romano		0,791	0,323	0,749
S.M. Angioletti		0,784	0,359	0,863
S.M. Morelli	Corpo 1	0,78	0,312	0,703
	Corpo 2	0,783	0,302	0,671
	Corpi 3, 4	0,78	0,252	0,5
	Corpo 5	0,791	0,252	0,512
	Corpo 6	0,755	0,243	0,443
	Corpo 7	0,753	0,22	0,366
S.M. D'Assisi	Corpo 1	0,752	0,327	0,697
	Corpo 2	0,752	0,266	0,515
	Corpo 3	0,782	0,397	0,953
	Corpo 4	0,752	0,118	0,2
	Corpo 5	0,779	0,327	0,751
	Corpo 6	0,752	0,282	0,565
	Corpo 7	0,752	0,112	0,3
S.M. Leopardi	Corpo 1	0,788	0,29	0,634
	Corpo 2	0,764	0,257	0,5
	Corpo 3	0,761	0,187	0,263
S.El. Don Milani		0,777	0,314	0,705
S.El. Scappi S. Elena	Corpo 1	0,76	0,258	0,498
	Corpo 2	0,785	0,236	0,455
	Corpo 3	0,76	0,115	0,25

Per una maggiore chiarezza, i risultati sono illustrati negli istogrammi di Figura 7.8. Essi mostrano come da un punto di vista sismico, la vulnerabilità delle scuole in c.a. di Torre del Greco sia pressappoco la stessa. Nei riguardi delle azioni specificatamente vulcaniche (depositi da caduta e flussi piroclastici) e vulcaniche globali (in considerazione anche del sisma), invece, alcune strutture (Romano, Angioletti e D'Assisi 3) esibiscono una maggiore vulnerabilità imputabile soprattutto ad un elevato numero di finestre grandi senza protezione sulle facciate esposte.

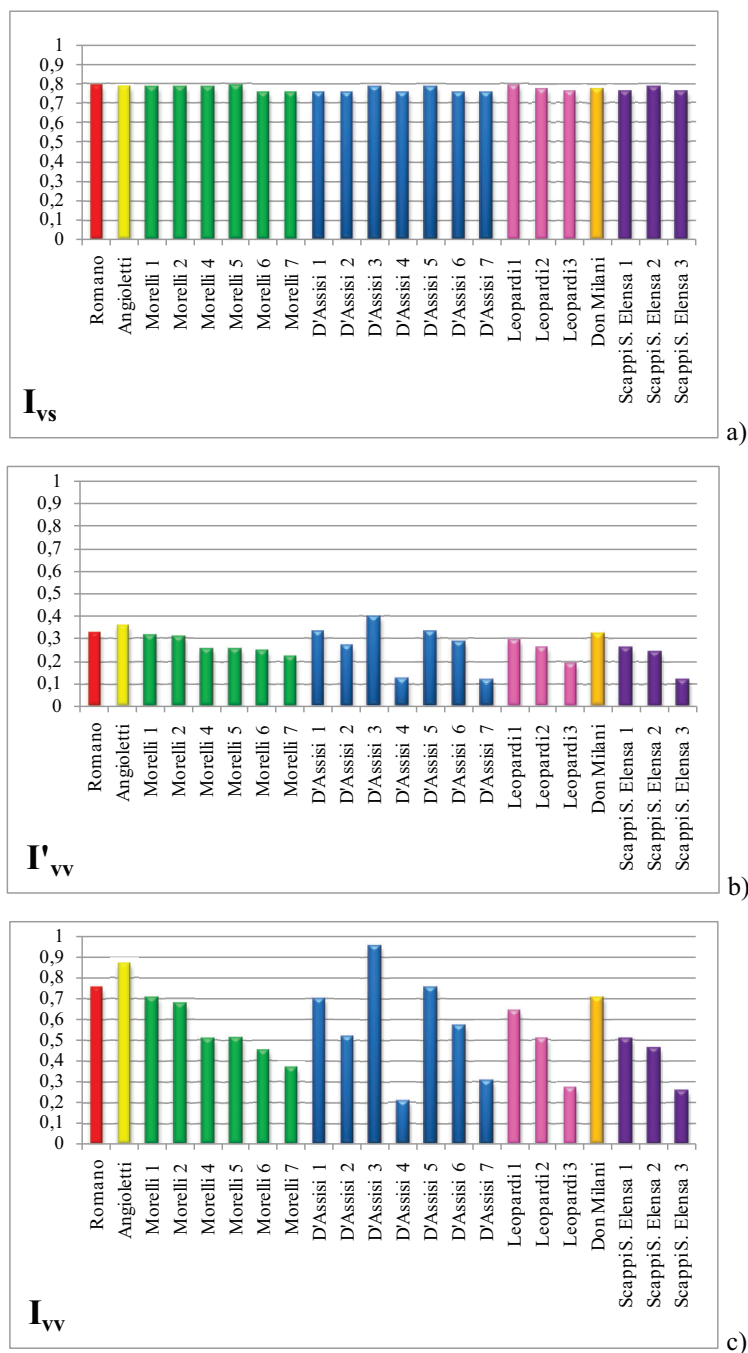


Figura 7. 8. Scuole in c.a. di Torre del Greco. Indici di vulnerabilità: a) sismico (I_{vs}); b) vulcanico (I'_{vv}); c) vulcanico globale (I_{vv}).

7.2.2 *Le Ville Vesuviane*

La metodologia speditiva proposta nel par.4.3.2 è stata applicata anche alle 9 ville Vesuviane rilevate. La valutazione della loro vulnerabilità nei riguardi degli eventi sismici e vulcanici, in considerazione anche della presenza di beni artistici monumentali, è riportata in Tabella 7.5.

Gli indici di vulnerabilità sismico (I_{VS}), strettamente vulcanico (I_{VV}) e da beni monumentali (I_{VBM}) sono stati stimati in accordo con i metodi multicriterio AHP e Topsis, secondo i pesi dei criteri assegnati nelle Tabelle 4.11, 4.12 e 4.13, rispettivamente. Invece, gli indici di vulnerabilità vulcanica globale della struttura, assunta come ordinaria (I_{VV}) o come bene monumentale (I_{VVBM}), sono stati determinati combinando gli indici precedenti secondo le relazioni (4.15) e (4.16), rispettivamente.

Gli indicatori a_{ij} delle matrici di decisione (Tabella 4.8), utilizzati per misurare la prestazione dell'alternativa i -esima rispetto al criterio j -esimo, sono scelti su basi diverse:

- ad alcuni criteri è stato associato direttamente il valore presente sulla scheda (n° piani; spessore strutture verticali e tamponature; n° finestre piccole, medie e grandi; orientamento facciata a rischio; distanza dal cratere; ecc.);
- ad alcuni criteri è stato associato il carico ultimo dell'elemento resistente (coperture e solai) o la tensione di rottura del materiale (strutture verticali e tamponature);
- ad alcuni criteri è stato associato un punteggio numerico corrispondente ad un giudizio verbale. Ad esempio: assente/basso (3), medio (6), alto (9) per il livello di progettazione antisismica; scadente (2), mediocre (5), buono (8), eccellente (10) per lo stato di conservazione della struttura; e assente (0), presente (1) in merito agli elementi di vulnerabilità sismica della MEDEA;
- ad altri criteri è stato associato un numero coincidente con il peso ottenuto dalla riapplicazione del metodo AHP. Ad esempio manutenzione straordinaria (0,0006), miglioramento (0,0194), adeguamento (0,9798) nel caso degli interventi subiti dalla costruzione; e assenti (0,877) e presenti con scarso (0,112), medio valore (0,012) o alto (0,002) valore nel caso della stima della qualità e della quantità dei beni artistici.

Tabella 7. 5. Ville Vesuviane. Indici di vulnerabilità sismico (I_{VS}), vulcanico (I'_{VV}), da beni artistici (I_{BM}) e vulcanico globale da struttura ordinaria (I_{VV}) o da bene monum. (I_{VVB}).

VILLA	I_{VS}	I'_{VV}	I_{BM}	I_{VV}	I_{VVB}
Villa Campolieto	0,511	0,336	0,593	0,563	0,446
Villa Aprile	0,559	0,277	0,332	0,536	0,267
Villa Ruggiero	0,389	0,322	0,488	0,490	0,274
Parco sul mare di Villa Favorita	0,529	0,384	0,402	0,611	0,337
Villa Bruno	0,514	0,350	0,534	0,576	0,413
Villa delle Ginestre	0,494	0,592	0,399	0,685	0,475
Villa Macrina	0,828	0,353	0,405	0,742	0,604
Villa Mascolo	0,384	0,331	0,389	0,495	0,164
Villa Vannucchi	0,423	0,371	0,295	0,541	0,157

Per una maggiore chiarezza, i risultati sono illustrati negli istogrammi delle Figure 7.8 e 7.9. Essi mostrano come da un punto di vista sismico, la residenza più vulnerabile risulti Villa Macrina per la presenza di molti orizzontamenti (comprese le coperture) costituiti da volte in muratura non consolidate. Nei riguardi delle azioni specificatamente vulcaniche (depositi da caduta e flussi piroclastici), invece la struttura più vulnerabile risulta Villa delle Ginestre a causa della sua particolare esposizione ai flussi piroclastici. Per quanto concerne la presenza dei beni artistici, la residenza più ricca e, dunque più vulnerabili, risulta Villa Campolieto caratterizzata da un numero notevole di affreschi, stucchi e quadri.

Dalla combinazione degli effetti sismici e vulcanici, assumendo le strutture analizzate come ordinarie, Villa Macrina e Villa delle Ginestre continuano a mantenere il loro primato in termini di vulnerabilità. Invece, tenendo in considerazione anche la presenza dei beni artistici tra le residenze più vulnerabili compare anche Villa Campolieto.

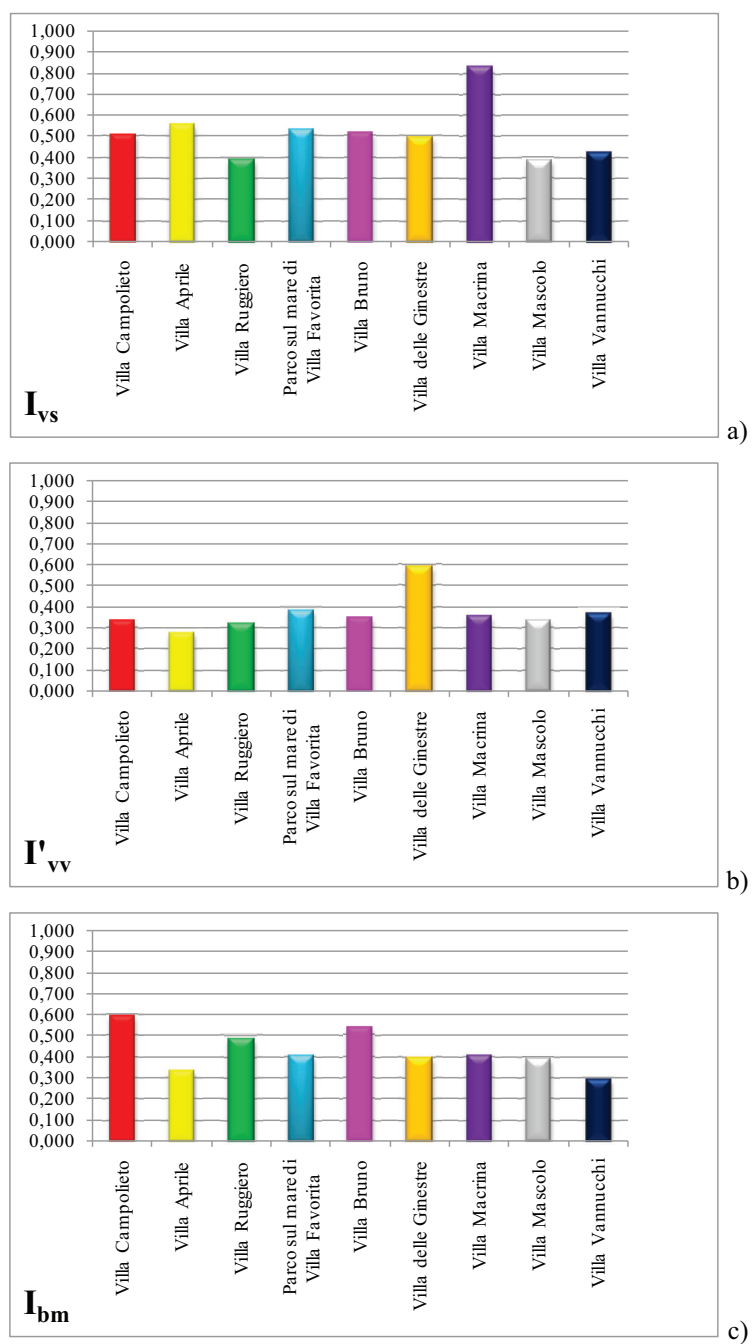


Figura 7. 9. Ville Vesuviane. Indici di vulnerabilità: a) sismico (I_{vs}), b) vulcanico (I'_{vv});

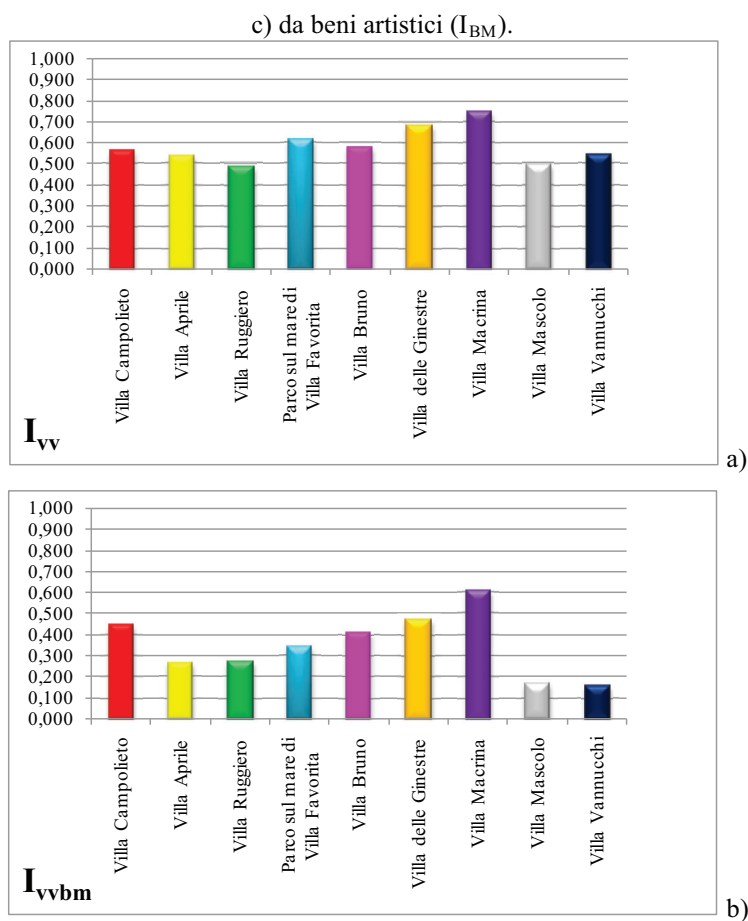


Figura 7. 10. Ville Vesuviane. Indici di vulnerabilità vulcanica globale da: a) strutture ordinarie (I_{VV}); b) beni monumentali (I_{VVBM}).

Capitolo 8

Interventi di mitigazione

8.1. LE LAVE

Data l'inarrestabile potenza dei flussi lavici, il primo intervento di protezione/prevenzione dovrebbe consistere in una pianificazione del territorio (protezione passiva) che eviti l'edificazione in aree a rischio.

Fortunatamente, le velocità di scorrimento della lava sono generalmente di qualche chilometro all'ora e, dunque, il rischio può essere ridotto anche deviando, contenendo, raffreddando o interrompendo i flussi (protezione attiva).

Contenimento e deviazione dei flussi lavici

Il rallentamento o la deviazione di colate laviche provocati dall'urto della lava contro barriere costruite a quello o a tutt'altro scopo (le mura della città ed i muri eretti dagli abitanti di Catania nel 1669; una sopraelevazione ferroviaria alta solo 2-3m nel 1955 presso il villaggio di Kapoho nell'isola di Hawaii) e l'osservazione del comportamento dei flussi lavici in corrispondenza di ostacoli morfologici naturali, hanno ispirato da molti anni l'idea di usare barriere artificiali per guidare il corso dei flussi lavici. Fino agli anni '80 le uniche esperienze sono quelle realizzate nelle Hawaii. Nel 1955, dei piccoli argini vennero realizzati velocemente per tentare di deviare una colata del Kilauea: il successo fu "limitato" (Macdonald e Hubbard, 1975). Nel 1960, presso il villaggio di Kapoho venne sopraelevato un dosso naturale, disposto

quasi ortogonalmente alla direzione del flusso lavico, per proteggere un faro di grande importanza. Vennero costruiti 6 argini lunghi da 150m a 2295m, alti da 1,5 a 7,6m e con una larghezza massima della base di 22-27m (Mac Donald, 1962). La lava scavalcò l'ostacolo ma una parte importante del flusso venne deviata lateralmente ed il faro si salvò. Anche in Giappone si realizzò, negli anni '70, un intervento preventivo chiudendo una breccia sulla parete della caldera di Oshima, ma la lava non vi arrivò. Nel 1937 e nel 1950 fu proposta la costruzione di barriere come opera preventiva di protezione della città di Hilo, la capitale dell'isola di Hawaii, tuttavia, ad oggi, queste barriere non sono state costruite. Nel commentare i risultati incoraggianti ottenuti nel 1955 e nel 1960 nelle Hawaii, (Macdonald e Hubbard, 1975) espresse il dubbio sull'utilità delle barriere di deviazione nei confronti della lava più viscosa tipo "aa", tipiche di molti vulcani continentali tra cui l'Etna. Espresse inoltre la necessità di avere barriere con base molto larga e costituite da materiale più denso della lava liquida che deve contenere o deviare, allo scopo di evitare che il flusso la sfondi o la rimuova. In realtà, già a Catania nel 1669, bastioni, alti 18m, avevano retto benissimo la spinta della lava fino ad esserne trascinati ma non travolti. In ogni caso, l'esperienza etnea del 1983 fugò tutti questi dubbi e preoccupazioni. Quattro barriere in terra, lunghe da 580 a 300m ed alte da 8 a 20m (Colombrita, 1984), funzionarono egregiamente ed impedirono che la lava (una delle usuali colate "aa" dell'Etna) si espandesse lateralmente, distruggendo importanti insediamenti (Rifugio Sapienza; Osservatorio Astrofisico ed edifici nella zona del Grande Albergo). Le barriere furono costruite con materiale per lo più incoerente di bassa densità (scorie, lapilli, ceneri) ma resistettero senza problemi alla spinta laterale della colata. Una delle barriere continua a funzionare anche dopo essere stata sommersa totalmente dalla lava, come fu già osservato a Kapoho. A parte il menzionato intervento, effettuato sull'isola di Hawaii nel 1960, fino al 1992 sono state sperimentate (e pochissime volte) solo barriere costruite sui fianchi del flusso lavico ed orientate diagonalmente (meno di 45°) rispetto alla sua direzione. Il loro scopo non è fermare la lava, ma dirigerla verso zone dove a danno potenzialmente minore. Il terrapieno costruito nel gennaio 1992 a Portella Calanna (Barberi et al., 1993; Calvari e Pinkerton, 1998) è la prima diga di sbarramento vera e propria, orientata ortogonalmente alla direzione del flusso lavico, costruita allo scopo di rallentare l'avanzata di una colata lavica.

Si tratta del manufatto più elevato (20m) finora costruito per controllare la lava. Quest'opera ha contenuto la lava per circa un mese obbligandola a disperdersi nell'ampio bacino della Val Calanna. Costruita con materiale di riporto di bassa densità (terra, scorie con minori blocchi lavici), ha resistito senza difficoltà alla spinta esercitata dalla colata che vi si è appoggiata ed accumulata contro con ripetuti flussi sottili di lava fluida, emessi dalle bocche effimere che si aprivano sui fronti delle più potenti colate "aa". L'esperienza 1992 dell'Etna insegna, quindi, che è possibile contenere l'avanzata di ogni tipo di lava basaltica con terrapieni di sbarramento in terra di altezza adeguata. L'utilità di un intervento di questo tipo dipende dalle condizioni morfologiche. Occorre un'ampia valle che si chiuda a strettoia in modo che il terrapieno non abbia dimensioni e costo eccessivi che il bacino a monte possa ospitare grossi volumi di lava, rallentando a lungo l'avanzata della colata. Interventi di contenimento e parziale deviazione dei flussi lavici sono stati realizzati nel 2001 e 2002, in occasione di eventi eruttivi che hanno parzialmente distrutto le stazioni turistiche del Rifugio Sapienza e di Piano Provenzana (Behncke e Neri, 2003).

In questi casi più recenti, gli argini in terra sono stati disposti in senso obliquo rispetto al fronte lavico in avanzamento, con lo scopo di deviare il flusso incandescente lateralmente alle costruzioni maggiormente significative. Anche in questi due recenti casi gli interventi hanno avuto un sostanziale successo, limitando come possibile i danni, che pure sono stati ingenti, nell'area del piazzale Sapienza (Figura 3.5).

Meno rilevanti sono il tipo di materiale impiegato nella costruzione di dighe e terrapieni, nonché la loro forma, anche se un pendio dolce è preferibile perché favorisce l'espansione laterale della lava ed ostacola l'erosione della diga durante la tracimazione. Entrambi i parametri devono obbedire solo alle leggi dell'ingegneria, dell'economicità e del rispetto ambientale. E' ovvio comunque che il definitivo successo di una diga di sbarramento dipende dalla durata e dalle caratteristiche dell'eruzione. Come gli altri tipi di intervento, anche la costruzione di un terrapieno di sbarramento mira solo a guadagnare tempo: qualsiasi terrapieno è destinato ad essere scavalcato dalla lava, se il tasso di effusione si mantiene sostenuto per un tempo sufficientemente lungo.

Oggi, comunque, le barriere di terra (generalmente di materiale sconnesso), hanno dimostrato la loro affidabilità, ma un utile contributo è offerto anche

dallo studio di barriere innovative più efficienti e più facilmente erigibili di quelle in terra. Ad esempio, Marsella et al. (2008) propongono l'utilizzo di barriere costituite da gabbioni metallici di forma parallelepipedica con all'interno terra, scorie, ceneri e frammenti di pietra lavica. Le singole gabbie sono accostate a formare un muro a gravità di sezione trapezoidale (Figura 8.1).

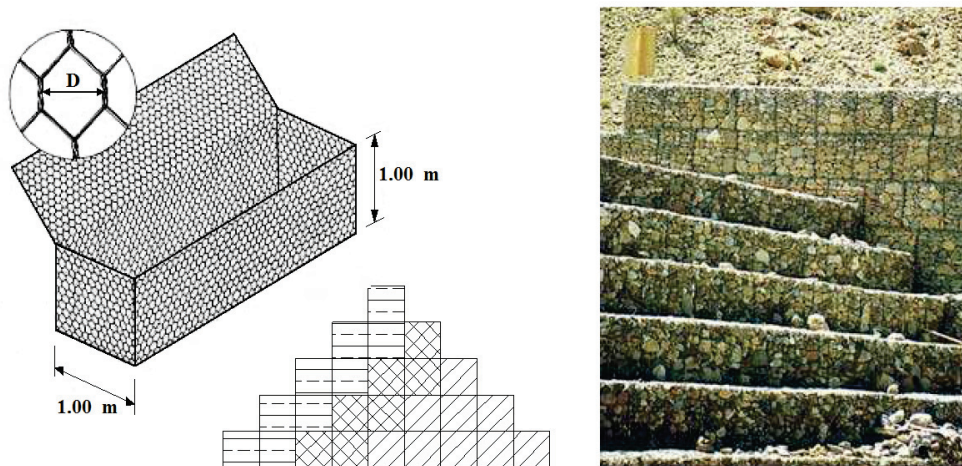


Figura 8. 1. Barriere costituite da gabbioni metallici con all'interno terra, scorie, ceneri e frammenti di pietra lavica (Marsella et al., 2008).

Rispetto ai comuni argini in terra, le barriere a gabbioni hanno lo svantaggio di far aumentare i costi, ma presentano molti altri vantaggi come la necessità di un minor volume di materiale di riempimento, la trasportabilità dei moduli in elicottero, la disponibilità di gabbioni pronti in magazzino e il riutilizzo di moduli che non siano coperti di lava .

Raffreddamento della lava con getti d'acqua

Durante l'eruzione del Kilauea del 1960, mentre una colata distruggeva una dopo l'altra le case del villaggio di Kapoho, i Vigili del Fuoco ebbero l'idea di provare a rallentare la lava raffreddandola con getti d'acqua. Riuscirono così a controllare per alcune ore l'espansione del margine laterale della colata, guadagnando il tempo necessario per rimuovere gli oggetti da alcune case e persino a spostarne una (Macdonald e Hubbard, 1975). Un uso più massiccio dell'acqua fu adottato nel 1973 nell'isola di Heimay (Islanda), quando 900 litri

al secondo di acqua di mare vennero pompate sul fianco e sul fronte di una colata lavica che avanzava verso la città di Westmannaeyar, ottenendo qualche successo. Qualche successo venne ottenuto anche nel 1986 rallentando con getti d'acqua l'avanzata della lava il cui fronte era giunto a soli 200m dalla città di Motomaki nell'isola di Izu-Oshima in Giappone (Shimozuru, 1988). Anche sull'Etna, nel 1983, si è riusciti per qualche ora ad impedire che la lava tracimasse lateralmente dal canale lavico nel cantiere, innaffiando la lava che si affacciava con getti d'acqua pompate da autocisterne dei Vigili del Fuoco. Venne osservato, infatti, che una modesta aspersione d'acqua sulla lava incandescente favoriva la formazione di una crosta solida sufficiente a reggere la lava che gonfiava nel canale. In questo modo venne fatto crescere a poco a poco un muro di lava solida alto da 5 a 6m sopra l'argine precedente. La lava tracimò nel cantiere solo quando venne esaurita l'acqua resa disponibile con le cisterne. Da tutte queste esperienze si può concludere che l'uso dell'acqua può servire in qualche caso se si agisce sul fronte e su un fianco della colata cercando di favorire l'avanzamento della lava in direzione opposta. Agire solo sul fronte è inutile e persino pericoloso perché può favorire l'ingrottamento della lava o sovrapposizioni incontrollabili. Anche in questo caso occorre intervenire in zone morfologicamente favorevoli a guidare la lava verso il percorso voluto, che comunque non può essere molto diverso da quello naturale. Ovvio, poi, che occorre la facile disponibilità di grandi quantità d'acqua. In ogni caso questi interventi, come nel 1960 alle Hawaii, possono far guadagnare solo poco tempo e possono quindi risultare utili solo in qualche situazione critica (sgombero di un edificio, etc.).

Interruzione del flusso lavico

Gli interventi volti ad ottenere l'arresto dei fronti di una colata lavica interrompendone o riducendone l'alimentazione a monte sono, insieme con le barriere di contenimento o di deviazione, quelli che offrono le maggiori prospettive di successo. Tra l'altro essi, come i terrapieni di contenimento, offrono il vantaggio di limitare al massimo l'invasione di nuovi terreni da parte della lava, evitando così delicati problemi giuridici e di risarcimento dei danni. Vi sono stati finora pochissimi interventi di questo tipo. Vi è il famoso precedente storico degli abitanti di Catania che nel 1669, mentre con mezzi rudimentali aprirono una breccia nel fianco della colata che avanzava verso la

loro città, vennero messi in fuga dagli abitanti inferociti dei paesi vicini, timorosi che la lava deviata potesse minacciare le loro case. Dopo di allora, e fino agli interventi all'Etna del 1983 e 1992, sono da registrare solo due tentativi sulle isole Hawaii di bloccare un tunnel, bombardandone la volta (1935) e rompendone, sempre bombardandolo dall'alto, l'argine laterale di una colata canalizzata (1942). I risultati furono, secondo (Macdonald e Hubbard, 1975) "incoraggianti ma non conclusivi". Secondo Lockwood e Torgerson (1980) il bombardamento non produsse invece alcun "effetto significativo". Sempre ad Hawaii nel 1975 e 1976 furono condotti alcuni esperimenti bombardando un cono di scorie, il fianco di un canale lavico e la volta di un tunnel prodotti da un'eruzione preistorica del Mauna Loa. Furono usate bombe fino a 900kg di esplosivo. La volta del tunnel venne appena scalfita; il fianco del canale veniva distrutto in misura apprezzabile solo se di spessore sottile; nel cono di scorie le bombe aprirono invece ampi crateri (Lockwood e Torgerson, 1980). L'uso del bombardamento aereo o di missili, o di mezzi di artiglieria pesante, è stato riproposto all'Etna in modo più o meno generico e confuso, ogni qualvolta si sia prospetta l'esigenza di intervenire per interrompere il flusso di una colata lavica. Gli ufficiali e piloti dell'Aeronautica Militare e gli esperti di artiglieria dell'Esercito, espressamente consultati, dichiarano tuttavia che non era possibile assicurare la precisione richiesta nel caso dell'Etna. Sia nel 1983 che nel 1992 non si trattava infatti solo di interrompere il flusso lavico, ma si doveva far tracimare la lava da un solo lato del canale naturale (in entrambi i casi, il destro) evitando la fuoriuscita dal lato opposto, dove sarebbero sorti seri problemi (possibile distruzione della zona del Rifugio Sapienza nel 1983; possibile traiettoria verso il paese di Milo nel 1992). I piloti dei cacciabombardieri non assicurano nemmeno di riuscire a colpire il canale lavico largo 5m. Nel corso dell'emergenza del 1992, l'eventuale bombardamento aereo del canale lavico nella parte alta della Valle del Bove venne pertanto lasciato, nella massima discrezione, come un ultimo disperato intervento, da tentare solo nel caso che la lava fosse giunta alla periferia di Zafferana, senza che si fosse riusciti a fermarla con altri mezzi. Confrontando le esperienze maturate all'Etna nel 1983 e nel 1992, si sono ricavati vari insegnamenti. Innanzitutto la tecnica di collocazione ed uso dell'esplosivo è molto migliorata nel 1992. Appoggiando le cariche direttamente al setto solido da abbattere e non, come nel 1983, in

fori praticati nella parete, si ottengono i seguenti vantaggi: si risparmia il tempo necessario alla perforazione dei fori; si risolve molto più facilmente il problema di evitare il riscaldamento delle cariche; si evita di perturbare il regime di flusso nel punto di intervento (il restringimento del canale dovuto al raffreddamento della parete assottigliata e perforata fu la causa dei maggiori problemi avuti nel 1983); si può utilizzare una maggiore quantità di esplosivo; si opera in migliori condizioni di sicurezza.

D'altro lato, l'esperienza del 1992 indica chiaramente che limitarsi a tentare di ostruire un tunnel lavico immettendovi materiale solido produce benefici di breve durata.

In ognuno degli interventi praticati prima degli ultimi due, nei quali esisteva un canale di invito per la lava, si è in effetti riusciti sempre a bloccare parzialmente il tunnel ottenendo qualche risultato, quale la tracimazione della lava in prossimità dei punti di intervento, l'apertura di bocche effimere a valle o l'aumento del flusso da bocche già esistenti, con il conseguente arresto o rallentamento dei fronti. Tuttavia si è sempre trattato di benefici di breve durata, che hanno fornito al massimo due settimane di tregua prima che i fronti riprendessero il loro avanzamento. Occorre quindi, come effettuato nell'intervento conclusivo del 27 maggio 1992, procedere anche all'escavazione di un canale di invito di sezione adeguata, più profondo del letto naturale del flusso lavico, divergente possibilmente di soli pochi gradi dalla direzione naturale di flusso, e con un pendio ripido che favorisca un efficiente drenaggio della lava deviata. Ne consegue che l'uso di mezzi meccanici di adeguata potenza è assolutamente indispensabile in interventi di questo tipo. L'esistenza di una morfologia favorevole allo scorrimento della lava che si tenta di far uscire dal canale naturale rappresenta la condizione indispensabile per il successo delle operazioni. Il punto di intervento deve quindi essere scelto con grande cura.

Un delicatissimo problema è quello della preparazione del setto solido di separazione tra canale naturale e canale di invito, cioè della parete solida che dovrà essere fatta brillare con le cariche esplosive. Nel 1983 questo setto risultò troppo potente (da 3,5 a 6m) anche a causa del suo ispessimento per i ricordati fenomeni di raffreddamento prodotti dai lavori. La preoccupazione di assottigliare al massimo la parete ha causato invece, durante la fase (22 maggio) che ha preceduto di poco quella conclusiva del 27 maggio 1992, il

suo sfondamento da parte della lava, prima che il canale artificiale fosse stato completato. Queste difficoltà nascono dall'impossibilità di stimare con precisione le dimensioni e la forma del canale lavico, quando di esso si vede solo una piccola finestra sommitale. Si deve precisare infine, anche se i mezzi meccanici sono stati fondamentali per il successo dell'operazione 1992, che l'uso dell'esplosivo è indispensabile in questo tipo di interventi, in quanto solo con un'esplosione si può aprire istantaneamente una breccia di grosse dimensioni sul margine del canale lavico e far defluire un grosso volume di lava nel canale artificiale, evitando così che la lava si raffreddi subito ed otturi la falla.

Sebbene siano noti numerosi casi in cui è stato possibile intervenire per limitare il più possibile i danni derivanti da una colata di lava, sarebbe tuttavia sbagliato se scaturisse la convinzione che è possibile, sempre e comunque, intervenire a protezione dei centri abitati minacciati da tale fenomeno vulcanico. Le possibilità di intervento dipendono infatti dalla ubicazione delle bocche eruttive, dalla distanza tra queste e le aree abitate, dalla morfologia della zona di scorrimento della lava e soprattutto dalla sua velocità di avanzamento, che dipende a sua volta dal pendio, dalla viscosità e dal tasso di effusione.

In ogni caso quando si interviene in zone fortemente antropizzate, è questo il caso dell'Etna, esiste il rischio che la colata prodotta dalla deviazione possa distruggere nuove aree. Ne consegue che tali interventi pongono inevitabilmente grossi problemi giuridici e possono essere realizzati solo con una forte volontà politica che, pur ricercando il consenso popolare, imponga il diritto della scelta del minor danno.

8.2. I DEPOSITI DA CADUTA

Gli elementi di maggiore vulnerabilità nei riguardi dei depositi da caduta sono le coperture, dunque i principali interventi di mitigazione devono riguardare queste sotto-strutture.

Come evidenziato dalle analisi sui tetti vesuviani illustrati nel par. 6.4, il comportamento delle coperture nei riguardi dei depositi piroclastici è influenzato sostanzialmente da due fattori: il degrado termico dei materiali e l'inclinazione di falda.

Il degrado termico dei materiali è imputabile alle elevate temperature dei clasti ($150\text{-}400^{\circ}\text{C}$) e può essere mitigato attraverso l'utilizzo di un isolante termico, che, se caratterizzato da conducibilità termica pari a 0.04W/mK , è in grado di triplicare il tempo di collasso di coperture in legno, acciaio e latero-cementizie (Tabella 6.6). L'isolante assunto nelle analisi del par. 6.4 è uno strato di 3cm di lana di roccia, ma, prima di un qualsiasi suo utilizzo in ambito vulcanico, questo materiale necessita di essere testato alle alte temperature.

L'angolo di inclinazione di falda produce, invece, due conseguenze positive: l'allontanamento di parte dei depositi e l'aumento del carico ultimo residuo della struttura. Dunque, in aree a rischio vulcanico sarebbe opportuno fissare un'inclinazione di minima falda. Per i tetti piani essa può essere ottenuta (Zuccaro et al., 2010b): attraverso una sovrastruttura in un materiale leggero, come il Cold Formed Steel, CFS (Figura 8.2), in grado di non sovraccaricare la struttura sottostante; oppure attraverso gusci in Ultra High Performance Concrete, UHPC, caratterizzati da proprietà meccaniche molto elevate anche nei riguardi del fuoco e delle alte temperature con spessori molto bassi (fino a 2cm per campate di 5m).

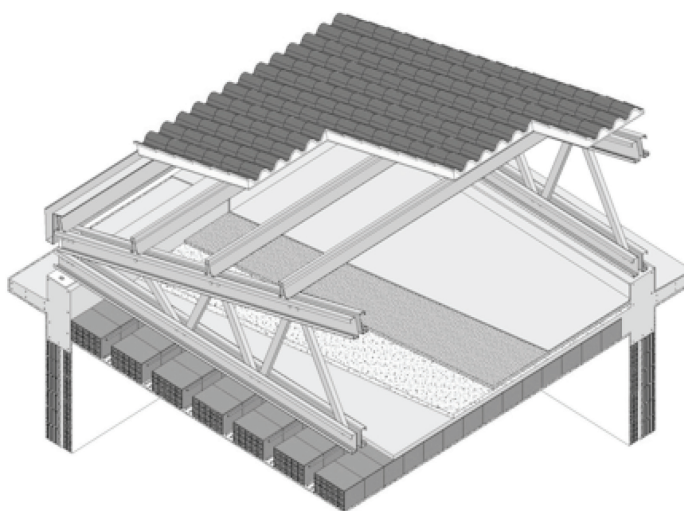


Figura 8. 2. Esempio di soluzione tecnica per la mitigazione degli effetti dei depositi da caduta attraverso l'utilizzo di CFS (Alborelli, 2009).

8.3. I FLUSSI PIROCLASTICI E MISSILI VULCANICI

I danni maggiori prodotti da un flusso piroclastico e dai missili vulcanici si registrano con riferimento agli elementi di chiusura. Dunque, le strategie di mitigazione devono riguardare principalmente il rinforzo delle tamponature e le protezioni delle aperture.

Per ridurre la sensibilità dei pannelli murari nei riguardi dei flussi e dei missili è necessario aumentarne la resistenza nei riguardi delle pressioni orizzontali e delle alte temperature. In assenza di vincoli specifici, questo duplice obiettivo potrebbe essere raggiunto sovrapponendo alle facciate esistenti dei rivestimenti in UHPC che, con piccoli spessori, sarebbero in grado di offrire elevate prestazioni termiche e meccaniche.

Le protezioni delle aperture devono essere in grado di resistere alle pressioni dinamiche indotte dai flussi, alle elevate temperature ed agli impatti prodotti dai missili messi in volo dalla corrente piroclastica. Le soluzioni possono essere rimovibili o integrate ai sistemi di chiusura. Nel primo caso, è possibile sovrapporre delle lamiere in acciaio o in kevlar, ancorate lungo il perimetro esterno delle aperture (Figura 8.3).

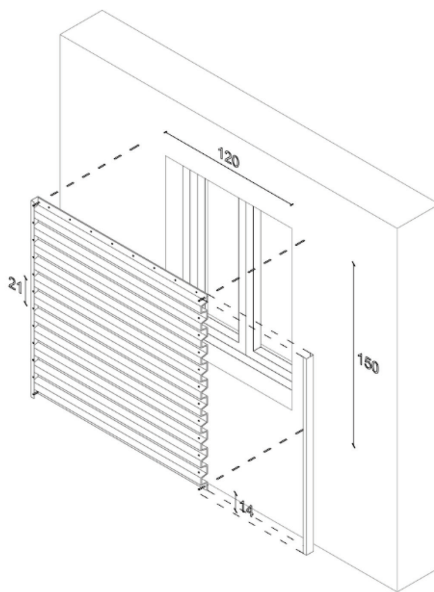


Figura 8. 3 Esempio di soluzione tecnica per la mitigazione degli effetti dei flussi piroclastici attraverso l'utilizzo di lamiere rimovibili (Alborelli, 2009).

Nel secondo caso, si potrebbe optare per una combinazione di persiane antincendio, in acciaio o alluminio, e speciali pellicole protettive sui vetri, allo scopo di aumentarne la resistenza nei riguardi di incendi e/o esplosioni.

8.4. I TERREMOTI VULCANICI

Generalmente, gli eventi sismici che caratterizzano un fenomeno eruttivo possono essere considerati di bassa e media intensità. Tuttavia, il danno cumulato, causato dalla sequenza di terremoti nelle varie fasi di un'eruzione e dalla combinazione dei diversi fenomeni eruttivi, può produrre un progressivo aumento del livello di danno atteso.

Nei riguardi dei terremoti vulcanici, gli interventi di mitigazione possono consistere in soluzioni tecniche economiche ma affidabili (come le catene in ferro per gli edifici in muratura o l'inserimento di pannelli di tamponatura o di elementi resistenti nei piani soffici degli edifici in c.a.), oppure in soluzioni più sofisticate, in grado di offrire resistenza supplementare non soltanto nei riguardi dell'azione sismica, ma anche in riferimento alle altre azioni vulcaniche.

In questo contesto, la realizzazione di una sovrastruttura di copertura in CFS (Figura 8.2) non solo mitigerebbe la vulnerabilità rispetto ai depositi da caduta, ma migliorerebbe anche il comportamento sismico, conferendo alla struttura un effetto scatolare più efficace ed evitando un incremento della massa partecipante dovuta ai clasti.

Invece, in aree a rischio vulcanico, va evitato l'impiego di sistemi di rinforzo che entrino in crisi in presenza di elevate temperature T . E' questo il caso degli FRP (Fiber Reinforced Polymers), le cui caratteristiche fisiche e meccaniche degradano per $T > 60-80^{\circ}\text{C}$. In questo caso, tecnologie alternative sono costituite dai sistemi in FRCM (Fiber Reinforced cementizio Matrix), capaci di resistere a temperature elevate conservando le proprietà meccaniche.

8.5. I LAHAR

I lahar costituiscono un fattore di rischio rilevante per le costruzioni in aree vulcaniche. La loro potenza distruttiva è legata all'altezza del fronte franoso

(pressione idrostatica), alla velocità e densità del flusso (pressione dinamica) ed agli elementi trascinati (impatto da detriti).

Come nel caso dei flussi piroclastici, gli elementi più vulnerabili ai lahar sono le aperture e le tamponature al piano terra. Un loro rinforzo, però, non è necessariamente in grado di garantire la sopravvivenza dell'edificio in caso di impatto diretto con la colata di fango e i detriti, soprattutto nel caso di aree urbane compatte, dove un "effetto tunnel" può aumentare la velocità e l'altezza del flusso dopo il passaggio all'interno di strade particolarmente strette. Per questo motivo, nel caso dei lahar, gli interventi più efficaci sono riconducibili alle strategie di mitigazione in materia di ingegneria ambientale, come bacini di ritenzione, canali artificiali e/o strutture di contenimento in c.a. ad alta resistenza.

8.6. GLI TSUNAMI

Nel caso degli tsunami, gli interventi di mitigazione, in termini di salvaguardia della vita umana, sono senz'altro costituiti da efficaci sistemi di *Early warning*. Da un punto di vista socio- economico, però, diventa importante anche poter preservare le costruzioni evitandone il contatto con il fronte d'onda, attraverso la costruzione di banchine, barriere coralline, frangiflutti, ecc., oppure migliorandone le capacità resistenti.

Il potere distruttivo di uno tsunami è da ricercarsi prevalentemente nell'impatto prodotto dai detriti trasportati dalla corrente. Nelle aree a rischio maremoto, dunque, sarebbe buona norma che coperture, solai, elementi resistenti, ponti e serbatoi di stoccaggio fossero ben ancorati alle travi, ai pilastri ed alle fondazioni. Nella progettazione delle strutture, inoltre, dovrebbero essere valutate le forze di galleggiamento e la resistenza dei sistemi di ancoraggio.

In ogni caso costruire le strutture e le infrastrutture più importanti (come stazioni dei vigili del fuoco e della polizia, ospedali, scuole, industrie pericolose, ferrovie, aeroporti, ponti, torri di comunicazione, impianti per la produzione di energia ecc.) in modo che possano sostenere le azioni imposte dallo tsunami significa ripristinare rapidamente i servizi, accelerare i recuperi e ridurre le sofferenze.

Conclusioni e sviluppi futuri

L'analisi della vulnerabilità vulcanica delle aree urbane ad alto rischio costituisce un campo di ricerca non del tutto investigato. Il presente lavoro di tesi ne esamina alcuni aspetti, con specifico riferimento al “caso Vesuvio”.

Le attività svolte si articolano sostanzialmente in tre parti.

La prima parte è relativa alla schematizzazione, qualitativa e quantitativa, delle azioni prodotte sulle costruzioni da ciascun fenomeno legato all'evento eruttivo (lave, depositi da caduta, flussi piroclastici, missili vulcanici, terremoti vulcanici, lahars e tsunami) e all'analisi degli effetti conseguenti.

La seconda parte è relativa alla proposta di una metodologia su due livelli, speditivo e meccanico, per la valutazione della vulnerabilità vulcanica.

La terza parte è relativa all'indicazione di specifici interventi di mitigazione.

Un'analisi critica dei risultati raggiunti mette in luce la necessità di future integrazioni.

La schematizzazione delle azioni potrebbe essere convogliata in regolamenti locali che assumano come carichi di progetto le forze prodotte dai fenomeni vulcanici. Ciò potrebbe essere utile soprattutto per le aree densamente abitate, vista la difficoltà di ridurre la popolazione residente, ma a questo scopo diventa necessaria una riscrittura puntuale delle azioni da eventi eruttivi, con specifico riferimento all'area vulcanica di interesse.

La proposta di metodologia per la valutazione della vulnerabilità vulcanica potrebbe essere un valido strumento nell'ambito delle analisi di rischio e/o di scenario per aree esposte, ma ciò richiede la determinazione di una correlazione tra indice di vulnerabilità e curve di vulnerabilità o matrici di danno. Per il raggiungimento di questo obiettivo, però, sarà necessario

implementare campagne sperimentali e analisi numeriche termo- meccaniche estese alle diverse tipologie costruttive delle aree a rischio, che compensino l'assenza di dati pregressi relativi ai danni da eruzione.

Sperimentazioni e analisi strutturali saranno necessarie anche per la messa a punto di interventi di mitigazione *ad hoc*, specie per i beni monumentali per i quali le tecnologie pensate per le strutture ordinarie non sono applicabili perché troppo invasivi. L'attenzione dovrà essere dedicata in particolare all'esame del comportamento dei materiali alle alte temperature.

Riferimenti bibliografici

Alborelli E., 2009. *Messa in opera di misure di mitigazione per edifici soggetti a precipitazione di materiale piroclastico. Tecnologie sostenibili per la riqualificazione delle coperture*. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Architettura.

Alterio L., De Gregorio D., Faggiano B., Di Feo P., Florio G., Formisano A., Mazzolani F.M., Cacace F., Zuccaro G., Borg R., Coelho C., Indirli M., Kouris L., Sword-Daniels V., 2010. *Survey activity for the seismic and volcanic vulnerability assessment in the Vesuvian area: the Golden Mile Villas*. Proceeding of the International Conference COST Action C26. Naples, Italy, 16-18 September 2010. pp: 647-652. ISBN 978-0-415-60685-1.

Angeletti P. e Gavarini C., 1984. *Un metodo di valutazione della vulnerabilità sismica per edifici esistenti di cemento armato. Confronti sperimentali*. Atti del II Convegno Nazionale sulla Ingegneria Sismica in Italia, Rapallo.

ATC 40, 1996. *Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Redwood City, California.

Barberi, F., Carapezza M., Valenza M., Villari L., 1993. *The control of lava flow during the 1991–1992 eruption of Mt. Etna*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 56, p. 1–34, doi: 10.1016/0377-0273(93)90048-V.

Baxter P.J., Boyle R., Cole P., Neri A., Spence R., Zuccaro G., 2005. *The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière*

Hills volcano, Montserrat. Bull Volcanol. 67:292–313. DOI 10.1007/s00445-004-0365-7

Behncke, B. e Neri A., 2003. *The July-August 2001 eruption of Mt. Etna (Sicily)*. Bull. Volcanol., DOI: 10.1007/s00445-003-0274-1.

Benoit J.P. e McNutt S.R., 1996. *Global Volcanic Earthquake Swarm Database 1979-1989*. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-69, p.334.

Bernstein R.S., Baxter P. J., Buist A.S., 1986. *Introduction to Epidemiological Aspects of Explosive Volcanism*. American Journal of Public Health, Suppl. Vol. 76, 3-9.

Benedetti D. e Petrini V., 1984. *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure*. L'Industria delle Costruzioni, vol. 18, pp. 66-78.

Blong, R.A. e McKee C., 1995. *The Rabaul Eruption 1994*. Natural Hazards Research Centre, Macquarrie University, New South Wales.

Borgia A. e Linneman S.R., 1990. *On the mechanism of lava flow emplacement and volcano growth: Arenal, Costa Rica*. In: Fink JH (ed) *Lava flows and domes*. Springer, Berlin HeidelbergNew York, pp 208-243.

Braga F., Dolce M., Liberatore D., 1982. *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K.-76 scale*. Proc. of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Atene.

Calvari S. e Pinkerton H., 1998. *Formation of lava tubes and extensive flow field during the 1991–1993 eruption of Mount Etna*. Journal of Geophysical Research, vol. 103, n° b11, pp. 27,291-27,301.

Carlino S., 2001. *Le alluvioni e le colate di fango successive alle eruzioni del Vesuvio. Storia e considerazioni sul rischio*. In Bifulco C. (a cura di). "Interventi di ingegneria naturalistica nel Parco Nazionale del Vesuvio". Ente Parco nazionale del Vesuvio, San Sebastiano al Vesuvio (Napoli). pp.43-69.

Cas R.A.F. and Wright J.V., 1988, *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. Chapman & Hall, London, p. 528.

CAVW Editors. 1951-1975. *Catalog of Active Volcanoes of the World*. Rome: International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, 22 volumes.

Chester D.K., Degg M., Duncan A.M., Guest J.E., 2001. The increasing exposure of cities to the effects of volcanic eruptions: a global survey. *Environmental Hazards* 2 (2001) 89-103.

Cioni, R., Longo, A., Macedonio, G., Santacroce, R., Sbrana, A., Sulpizio, R., Andronico, D., 2003. *Assessing pyroclastic fall hazard through field data and numerical simulations: example from Vesuvius*. *J. Geophys. Res.* 108 (B2), 2063. doi:10.1029/2001JB000642.

Colombrita R., 1984. *Methodology for the construction of earth barriers to divert lava flows: the Mt. Etna 1983 eruption*. *Bull. Volcanol.*, 47-4 (2), 1009-1038.

Cubellis E. e Marturano A., 2006. *Analysis of historical and present earthquakes at Vesuvius for seismic hazard evaluation*. XY0701 EGU 2006. Session NH5.03: Volcanic Hazard and Risk Vienna, Austria, July 02.

De Gregorio D., Faggiano B., Formisano A., Mazzolani F.M., 2010a. *Air fall deposits due to explosive eruptions: action model and robustness assessment of the Vesuvian roofs*. *Proceeding of the International Conference COST Action C26*. Naples, Italy, 16-18 September 2010. pp: 507-512. ISBN 978-0-415-60685-1.

De Gregorio D., Faggiano B., Florio G., Formisano A., De Lucia T., Terracciano G., Mazzolani F.M., Cacace F., Conti G., De Luca G., Fiorentino G., Pennone C., Zuccaro G., Borg R., Coelho C., Gerasimidis S., Indirli M., 2010b. *Survey activity for the seismic and volcanic vulnerability assessment in the Vesuvian area: the historical centre and a residential area of Torre del Greco*. *Proceeding of the International Conference COST Action C26*. Naples, Italy, 16-18 September 2010. pp: 653-658. ISBN 978-0-415-60685-1.

DM, 1980. Decreto Ministeriale 26 marzo 1980. *Norme tecniche per la esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche*. GU n. 176. 28-06-1980.

DPCM, 2006. *Approvazione dei modelli per il rilevamento dei danni, a seguito di eventi calamitosi, ai beni appartenenti al patrimonio culturale*. G.U. n.55 del 07/03/2006. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 febbraio 2006. ModelloB.

Del Pezzo E., Bianco F., Saccorotti G., 2004. *Seismic source dynamics at Vesuvius volcano, Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 133, 23–39.

Dobran F., 2006. *VESUVIUS. Education, security and prosperity*. Elsevier.

Dobran F. e Mascolo I., 1998. *Previsione di eruzione*. GVES NEWS LETTER. Vol. 4/1.

EMS, 1998. *European Macroseismic Scale, 1998*. Conseil de l'Europe. European Seismological Commission. 8 LUXEMBOURG 1998.

Escher B.G., 1922. *On the hot 'lahar' (mud flow) of the valley on Ten Thousand Smokes (Alaska)*. Proceedings Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Amsterdam 24, 282-293.

Esposti Ongaro T., Neri A., Menconi G., de'Michieli Vitturi M., Marianelli P., Cavazzoni C., Erbacci G., Baxter P.J., 2008. *Transient 3D numerical simulations of column collapse and pyroclastic density current scenarios at Vesuvius*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 178 (2008) 378–396.

Esposti Ongaro T., Neri A., Todesco M., Macedonio G., 2002. *Pyroclastic flow hazard assessment at Vesuvius (Italy) by using numerical modeling. II. Analysis of flow variables*. Bull. Volcanol (2002) 64:178–191. DOI 10.1007/s00445-001-0190-1.

Eurocodice 2, Parte 1.2., 2005. *Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Regole generali. Progettazione strutturale contro l'incendio*. UNI EN 1992-1-2.

Faella C. e Nigro E., 2002. *Debris flow effects on constructions. Damage analysis, collapse mechanisms, impact velocities, code provisions*. Internal Report COST-C12/WG2. Volos, Greece, 14-15 June.

Fajfar, P. 1999. *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*. Earthquake Engineering and Struct. Dyn., 28: 979-993.

Festa G., Zollo A., Manfredi G., Polese M. and Cosenza E., 2004. *Simulation of the earthquake ground motion and effects on engineering structures during the pre-eruptive phase of an active volcano*. Bull. Seism. Soc. Am., 94, 6, 2213-2221.

Florio G., Landolfo, R., Formisano, A. and Mazzolani, F.M., 2009. *Vulnerability of a historical masonry building in the Vesuvius area*.

Proceedings of PROHITECH 2009 International Conference, Rome 21-24 June Vol. 2: 1483-1488. ISBN: 978-0-415-55805-1.

Florio G., De Gregorio D., Formisano A., Faggiano B., De Lucia T., Terracciano G., Mazzolani F.M., Cacace F., Conti G., De Luca G., Fiorentino G., Pennone C., Zuccaro G., Borg R., Coelho C., Gerasimidis S., Indirli M., 2010. *Survey activity for the seismic and volcanic vulnerability assessment in the Vesuvian area: the school buildings of Torre del Greco*. Proceeding of the International Conference COST Action C26. Naples, Italy, 16-18 September 2010. pp: 667-672. ISBN 978-0-415-60685-1.

Fournier d'Albe E.M., 1979. *Objectives of Volcanic Monitoring and Prediction*. Journ.. Geol. Soc. Lond. 136, 321-326.

Foxworthy B.L. e Hill M., 1982. *Volcanic Eruptions of 1980 at Mount St. Helens: The First 100 Days*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1249, 125 p.

Ghobaraha A., Saatcioglu M., Nistorb I. 2006. *The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structures and infrastructure*. Engineering Structures. Volume 28, Issue 2, January 2006, Pages 312-326.

Gurioli L., Zanella E., Cioni R., Lanza R., 2008. *Determinazione paleomagnetica delle temperature di messa in posto di flussi piroclastici dell'eruzione del 79 d.c. del Vesuvio*. GNGTS- Atti del 18° Convegno Nazionale. 08/12.

Hwang C.L. e Yoon K., 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Kilburn C.R.J., Pinkerton H., Wilson L., 1995. *Forecasting the behaviour of lava flows*. In: "Monitoring Active Volcanoes", McGuire, WJ Kilburn, CRJ Murray, JB (eds.) University College Press, London, pp 346-368.

Kilburn C.R.J. e Guest J. E., 1993. *Aa lavas of Mount Etna, Sicily, in Active Lavas: Monitoring and Modelling*. Edited by C. R. J. Kilburn and G. Luongo, pp 73-106, UCL Press, London.

Kiyono J., Spence R.J., Nakashima T., 2006. *Dynamic behavior of masonry structures under pyroclastic flows*. Journal of Natural Disaster Science, Volume 28, Number 2, pp73-83.

Legge 1086, 1971 (5 Novembre). *Norme per la disciplina delle opere in conglomerate cementizio normale e precompresso ed a struttura metallica*. G.U. 21.12.1971, n°321.

Lipman P.W. e Mullineaux D. R., 1981. *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, 844p.

Lockwood, J.P., e Torgerson F.A., 1980. *Diversion of lava flows by aerial bombing. Lessons from Mauna Loa Volcano, Hawaii*. In Garcia M.O. and Decker R.W., ed(s): "G.A. Macdonald Special Memorial Issue". Bulletin Volcanol., v. 43, no. 4, p. 727-741.

Macdonald G.A., 1972. *Volcanoes*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 510 p.

Macedonio G., Costa A., Folch A., 2008. *Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 178: 366-377.

Marsella M., Coltelli M., Napoleoni Q., Scifoni S., 2008. *Simulazione di colate laviche per la progettazione di barriere di contenimento. Caso di studio Etna 2001*. INGV sezione di Catania. www.ct.ingv.it

Mazzolani F.M., Faggiano B., Formisano A., De Gregorio D., Nunziata C., Mandara A., 2010a. *Volcanic and tectonic earthquakes effects in the Vesuvian urban habitat*. Proceedings of the International Conference 14th ECEE, European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, August 30- September 03. Paper n. 1179 on CD. ISBN 978-608-65185-1-6.

Mazzolani F.M., Faggiano B., Formisano A., De Gregorio D., Indirli M., Zuccaro G., 2010b. *Survey activity for the volcanic vulnerability assessment in the Vesuvian area: the 'quick' methodology and the survey form*. Proceedings of the International Conference COST Action C26. Naples, Italy, 16-18 September 2010. pp: 693-698. ISBN 978-0-415-60685-1.

Mazzolan F.M., Faggiano B., De Gregorio D., 2009a. *The catastrophic scenario in explosive volcanic eruptions in urban areas*. Proceeding of Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Rome, Italy, 21-24 June. Vol. 2: 1529-1534. ISBN: 978-0-415-55805-1.

Mazzolan F.M., Faggiano B., Formisano A., De Gregorio D., 2009b. *Vulnerability evaluation of RC structures in the Vesuvian area*. Proceeding of

Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Rome, Italy, 21-24 June. Vol. 2: 1523-1528. ISBN: 978-0-415-55805-1.

Mazzolani F.M., Indirli M., Zuccaro G., Faggiano B., Formisano A., De Gregorio, D., 2009c. *Catastrophic effects of a Vesuvian eruption on the built environment*. Proceeding of PROTECT Conference 2009.

Mazzolani F.M., Faggiano B., De Gregorio D., 2008. *Actions in the catastrophic scenarios of a volcanic eruption*. Proceedings of the International Symposium Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events, Valletta, Malta, 23-25 October, vol. 1, p. 449-467, ISBN/ISSN: 978-99909-44-40-2.

Mazzolani F. M., Mandara A., Faggiano B., 2007. *Structural integrity and robustness assessment of historical buildings under exceptional situations*. Proceeding of PROTECT '07. Whistler, 20-22 Agosto.

Macdonald G.A. e Hubbard D.H., 1975. *Volcanoes of the National Parks in Hawaii*. Hawaii Nat Hist Assoc, 60 p.

Newhall C.F. e Self S., 1982. *The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive Magnitude for historical eruptions*. J.Geoph. Res. 87, 1231-1238.

NTC, 2008. DM 14 gennaio 2008, *Nuove norme tecniche per le costruzioni*. Gazzetta Ufficiale n.29 del 4 febr. 2008. Suppl. Ordinario n.30.

Nunziante L., Fraldi M., Lirer L., Petrosino P., Scotellaro S., Cicirelli C., 2003. *Risk assessment of the impact of pyroclastic currents on the towns located around Vesuvio: a non-linear structural inverse analysis*. Bull Volcanol. 65:547-561. DOI 10.1007/s00445-003-0282-1

OPCM 3431, 2005 (3 Maggio) . Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri. *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Suppl. Ord. alla G.U. 10.05.2005, n°107.

Orsi G., Cuna L., De Astis G., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Nave R., Pappalardo L., Piochi M., Postiglione C., Sansivero F. 2002. *I vulcani napoletani: pericolosità e rischio*. Pubblicazione divulgativa Osservatorio Vesuviano. www.ov.ingv.it

Palermo D., Nistor I., Nouri Y., Cornett A., 2007. *Tsu-nami-Induced Impact and Hydrodynamic Loading of Near-Shoreline Structures*. Protect 2007, Whistler, Canada.

Rampino M.R. e Self S., 1992. *Volcanic winter and accelerated glaciations following the Toba super-eruption*. Nature 359, 50-52.

Regio Decreto 16/11/1939 n° 2229. *Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice ed armato*. Suppl. GU n. 92 del 18-4-1940.

Saaty T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill.

Shimozuru D., 1988. *Role of the coordinating committee, hazard mitigation and evacuation*. In "The 1986-1987 Eruption of Izu Oshima Volcano". Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, pp. 54-59.

Simkin T., Siebert L., McClelland L., Bridge D., Newhall C., Latter J.H., 1981. *Volcanoes of the World*. Hutchinson Ross, Pa. Usa pp. 233.

Scandone R. e Giacomelli L., 1998. *Vulcanologia: Principi Fisici e metodi di indagine*. Liguori.

Scandone R., D'Andrea M., 1994. *Il rischio vulcanico*, in V. Di Donna, A.Vallario (editori) "L'ambiente : Risorse e rischi", Liguori editore, Napoli, 130-150.

Scandone R., Arganese G., Galdi F., 1993. *The Evaluation of Volcanic Risk in the Vesuvian Area*. J. Volcanol. geoth. Res. 58, 261-273.

Spence R., Kelman I., Brown A., Toyos G., Purser D., Baxter P., 2007. *Residential building and occupant vulnerability to pyroclastic density currents in explosive eruptions*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 219-230.

Spence R., Kelman I., Baxter P.J., Zuccaro G., Petrazzuoli S. 2005. *Residential building and occupant vulnerability to tephra fall*. Natural Hazard and Earth System Sciences, 5, 477- 494.

Spence R.J.S., Baxter P.J., Zuccaro G., 2004a. *Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 133. 321-343.

Spence R.J.S., Zuccaro G., Petrazzuoli S., Baxter P.J., 2004b. *Resistance of Building to Pyroclastic Flow and Experimental Studies and Their Application to Vesuvius: a model and its application to Vesuvius*. Natural Hazards review, ASCE 5 (1), 48-59.

Tinti S., Maramai A., Graziani L., 2007. *The Italian Tsunami Catalogue (ITC), Version 2*. <http://www.ingv.it/servizi-e-risorse/BD/catalogo-tsunami/catalogo-degli-tsunami-italiani>.

Tinti S., Pagnoni G., Piatanesi A., 2003. *Simulation of tsunamis induced by volcanic activity in the Gulf of Naples (Italy)*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 311-320.

Todesco M., Neri A., Esposti Ongaro T., Papale P., Macedonio G., Santacroce R., Longo A., 2002. *Pyroclastic flow hazard assessment at Vesuvius (Italy) by using numerical modeling. I. Large-scale dynamics*. Bull Volcanol (2002) 64:155–177. DOI 10.1007/s00445-001-0189-7.

Unesco, 1972. Smithsonian Institution/SEAN, 1989. *Global Volcanism* Smithsonian Institution, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Vallario A., 1994. *Potenziale rischio idrogeologico al Somma-Vesuvio. Eruzione vesuviana del 1944- Ricordo di un evento eruttivo 50 anni dopo*. Comune di San Sebastiano al Vesuvio.

Walker G.P.L., 1973. *Explosive volcanic eruptions: a new classification scheme*. Geologische Rundschau, Volume 62, Number 2, Pages 431-446.

Wills J., Wyatt T., Lee B., 1998. *Warnings of High Winds in Densely Populated Areas*. Book 4 of the IDNDR Flagship Programme – Forecasts and Warnings, Thomas Telford, London.

Zuccaro G., Cacace F., Faggiano B., Nigro E., De Gregorio D., 2010a. *Volcanic actions and their consequences on structures*. Proceedings of the International Conference COST Action C26. Naples, Italy, 16-18 September 2010. ISBN 978-0-415-60685-1. pp: 659-665.

Zuccaro G., Leone M.F., Cacace F., 2010b. *Building technologies for the mitigation of volcanic risk*. Proceedings of the International Conference COST Action C26. Naples, Italy, 16-18 September 2010. ISBN 978-0-415-60685-1.

Zuccaro G., Cacace F., Spence R.J.S., Baxter P.J., 2008. *Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 178 (2008) 416–453

Zuccaro G., 2004. *Inventario e vulnerabilità del patrimonio edilizio residenziale del territorio nazionale, mappe di rischio e perdite socio – economiche*. (CD a cura di G. Zuccaro).

Zuccaro G. e Ianniello D., 2004. *Interaction of pyroclastic flows with building structures in an urban settlement: a fluid-dynamic simulation impact model*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 133 (2004) 345-352.

Zuccaro G. e Papa F., 2002. *A Multimedial Handbook For Seismic Damage Evaluation And Post Event Macroseismic Assessment*. European Seismic Conference, Genova, Settembre..

WEB SITE

Alean J., Carniel, R. and Fulle M. 2010. *Stromboli online*. www.swisseduc.ch

Earthquake Hazard Program, 2010. www.earthquake.usgs.gov

DST, Dipartimento di Scienza della Terra, 2010. Università degli studi di Napoli Federico II. Vulcani attivi della Terra. www.dst.unina.it

GNV, 2010. Gruppo Nazionale Vulcanologia. www.vulcan.fis.uniroma3.it/GNV

INGV, 2010. Istituto Nazionale di Geofisica e vulcanologia. www.ingv.it

Osservatorio Vesuviano, 2010. www.ov.ingv.it

Protezione Civile, 2010. Rischio vulcanico. www.protezionecivile.it

Siebert L. and Simkin T. 2002. *Volcanoes of the World: an Illustrated Catalog of Holocene Volcanoes and their Eruptions*. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-3, (<http://www.volcano.si.edu/world/>).

Texas Bureau of Economic Geology. 2009. [www. http://www.nps.gov](http://www.nps.gov)

USGS, 2010. Cascades Volcano Observatory, Vancouver, Washington. [www.vulcan. wr.usgs.gov](http://www.vulcan.wr.usgs.gov)

Vialattea.net. 2010. Divulgazione scientifica. www.vialattea.net

Glossario

ALCALI: nome degli idrati dei metalli alcalini (metalli del primo gruppo del sistema periodico: litio, sodio, potassio, rubidio e cesio).

ALLUMINA: ossido di alluminio, dotato di grande durezza e di alto punto di fusione.

ANDESITE: roccia effusiva neovulcanica, di colore grigio, verde o nero, costituita essenzialmente da plagioclasio sodico- calcico e da elementi femici.

ANELLO DI TUFO: vulcano monogenetico generato da eruzioni freato- magmatiche quando il magma interagisce con acqua di falda; è composto da materiale piroclastico ben stratificato, consolidato e con granulometria prevalentemente fine. E' caratterizzato da un cratere ampio, tipicamente tra 0,1 e 3km, fianchi interni ed esterni debolmente inclinati (<10-12°). Il rapporto tra diametro e altezza è compreso tra 10 e 50. Il materiale piroclastico che lo costituisce è composto da juvenili (>90%) e da rocce preesistenti frantumate dall'esplosione (litici); la messa in posto avviene per surge e in misura minore flusso piroclastico e caduta.

BLOCCO: frammento piroclastico con dimensioni superiori a 64mm di materiale litico emesso allo stato solido e derivante dall'edificio vulcanico o dal basamento, generalmente è spigoloso. In alcuni casi può essere costituito da materiale juvenile (distruzione di duomi, fratturazione di bombe). Un deposito consolidato costituito prevalentemente da blocchi e bombe è chiamato breccia piroclastica.

BOMBA: frammento piroclastico con dimensioni superiori a 64mm di materiale juvenile emesso allo stato fluido o semifluido che solidifica durante il tragitto in aria o appena ricaduto a terra. Si riconoscono diverse tipologie di bombe principalmente in funzione della tipologia di raffreddamento. *Bomba a crosta di pane* (bread crust bomb): caratterizzata da una superficie screpolata e fessurata per aumento di volume in seguito all'espansione dei gas nel nucleo ancora fuso. *Bomba affusolata* (spindle shaped bomb): formata da lava fluida che assume una forma fusiforme (aerodinamica) durante il lancio. *Bomba a focaccia* (cowdung bomb): bomba che cade al suolo ancora calda e almeno in parte plastica assumendo forme schiacciate. *Bomba armata:* bomba che ha un nucleo costituito da un frammento litico (cored bomb) o che è formata da frammenti e cenere umida (bomba composita, armoured bomb). Un deposito consolidato costituito prevalentemente da blocchi e bombe è chiamato breccia piroclastica.

CALDERA: ampia depressione di origine vulcanica, a contorno subcircolare o ellittico, di diametro generalmente superiore al chilometro. È caratterizzata da pareti subverticali e risulta dal collasso di una parte più o meno cospicua del tetto di una camera magmatica superficiale che si è svuotata in seguito ad una grossa eruzione.

CENERE: frammenti piroclastici di dimensioni minori di 2mm. Si distinguono in cenere grossolana (64µm-2mm) e cenere fine (<64µm). Quando consolidati formano tufo o tufo cineritico.

COLATA: termine generico che indica la modalità di messa in posto per flusso: colata di lava, colata piroclastica (v. flusso piroclastico), colata di fango (v. deposito di lahar), etc.

CONDOTTO VULCANICO: struttura attraverso la quale il magma risale alla superficie, può essere di forma sia cilindrica che fissurale.

CRATERE: termine generico indicante la depressione ad andamento subcircolare, posta al di sopra del condotto e attraverso la quale è stato emesso il materiale vulcanico.

DEPOSITO DA CADUTA: deposito piroclastico generato dalla ricaduta dei prodotti eiettati nell'atmosfera dalle eruzioni esplosive. Il trasporto avviene o in seguito alla sola energia cinetica dei frammenti lanciati dal centro di emissione (frammenti balistici) o, per i clasti più fini, ad opera del sollevamento dei gas caldi che formano la colonna eruttiva e dell'azione dei venti. In genere i depositi di caduta mantellano la topografia, il loro spessore e la granulometria decrescono con la distanza dal centro di emissione. Questo tipo di depositi è composto da uno o più strati ed è caratterizzato da buona classazione, struttura massiva o gradata, base non erosiva, presenza di strutture da impatto ed equivalenza idraulica tra pomici e litici. La distribuzione areale dei depositi di caduta è influenzata dalla direzione e dalla forza del vento al momento dell'eruzione; inoltre la topografia può determinare un certo controllo sulla distribuzione dei prodotti, quando questi ricadono su superfici molto inclinate e subito dopo rotolano verso valle.

DEPOSITO DA FLUSSO PIROCLASTICO: deposito piroclastico dovuto alla messa in posto, in massa, di un flusso gravitativo ad alta concentrazione, costituito da un miscuglio di particelle di varie dimensioni (juvenili e non), di gas ed eventualmente di aria intrappolata dall'ambiente circostante. Il regime del moto è di tipo laminare e solo localmente turbolento; la grande mobilità è dovuta alla fluidizzazione esercitata dai gas che tendono a fuoriuscire dal mezzo e che costituiscono un supporto fluidodinamico per le particelle. In genere i depositi di flusso piroclastico subiscono un forte controllo topografico accumulandosi nelle depressioni vallive. Il deposito è quasi completamente massivo, anche se è possibile riconoscere dei livelli con maggiore concentrazione di litici o pomici rispettivamente a gradazione normale o inversa, la cernita granulometrica è scarsa o assente, la base del deposito può essere erosiva e si può avere un certo grado di saldatura. Sono frequenti le strutture di degassazione. È sinonimo di deposito di colata piroclastica. Vedi anche ignimbrite.

DEPOSITO DA LAHAR: con il termine lahar si definisce un flusso di detrito e il relativo deposito che si origina sui fianchi di un vulcano per imbibizione d'acqua di un materiale vulcanoclastico poco coerente. I depositi di lahar presentano una variazione laterale di facies che va da quella tipica dei depositi da debris flow a quella dei flussi iperconcentrati. I lahar si possono originare sia in seguito a eruzioni, per esempio a causa del calore che scioglie la neve, sia indipendentemente da queste, per esempio a causa di forti piogge. Il deposito di

lahar è caratterizzato da una distribuzione fortemente controllata dalla topografia, classazione scarsa ed eterogeneità della composizione dei clasti. Nelle zone intermedie e distali il deposito tende a divenire più fine, stratificato e con un maggiore grado di selezione. Talvolta è indicato come deposito da colata di fango.

DEPOSITO DA SURGE: deposito piroclastico di flusso dovuto alla messa in posto di una corrente gravitativa a bassa concentrazione di particelle solide, altamente espansa e turbolenta. Il flusso è composto da particelle solide sempre subordinate a gas e acqua o vapore. Il sostegno delle particelle solide è garantito dalla elevata turbolenza che caratterizza questi flussi. In base all'analisi dei depositi, vengono distinti tre tipi di correnti piroclastiche a bassa densità: Base surge, ash-cloud surge e ground surge. I base surge si originano da eruzioni freatomagmatiche; il termine ground surge viene riferito a prodotti di surge che si trovano alla base di un deposito di flusso piroclastico; l'ash-cloud surge consiste in una corrente che si forma per la segregazione di ceneri nella parte superiore di un flusso piroclastico. I depositi dovuti a surge subiscono un controllo topografico limitato essendo in grado di superare, grazie all'elevata turbolenza, anche zone abbastanza rilevate. Questi depositi, sempre a granulometria fine, si suddividono in tre facies in funzione della distanza dal cratere: nella zona prossimale sono presenti una fitta stratificazione parallela o incrociata e strutture a dune o antidune; in quella intermedia gli strati sono discontinui e massivi; infine nella zona distale il deposito è a stratificazione parallela con gradazione inversa. Queste variazioni di facies testimoniano il variare del meccanismo di trasporto con la diminuzione della densità del flusso dalla zona prossimale verso quella distale.

DEPOSITO PIROCLASTICO: termine generico riferito ai depositi formati dai prodotti emessi durante le eruzioni esplosive; questi possono essere suddivisi in depositi di caduta e in depositi di flusso in funzione dei meccanismi di trasporto e sedimentazione.

DICCO: intrusione sub-superficiale di magma con geometria planare, discordante e a inclinazione da media a verticale. L'orientazione dei dicchi fornisce indicazioni importanti sull'assetto strutturale di una regione. In rapporto alle strutture di un edificio vulcanico i dicchi possono essere anulari, conici, radiali, periferici o tangenziali. Possono essere indicati con il termine filoni quando il loro spessore è ridotto (al massimo qualche metro).

DUOMO: vulcano generalmente monogenico costituito da un accumulo di lava con forma a bulbo e pareti ripide, che si installa sulla verticale di un condotto senza grande espansione laterale. Si forma in seguito all'emissione di lave acide e molto viscosi con un contenuto di gas insufficiente a innescare una grande eruzione esplosiva; tipicamente la composizione chimica è riolitico- riodacitica o dacitico- andesitica. Un duomo può essere isolato, può essere un apparato satellite di un edificio vulcanico maggiore, oppure può essere associato a parecchi altri duomi fino a formare un campo di duomi. In genere sulla base delle modalità di crescita si tendono a distinguere due tipologie di duomo. Duomo endogeno: quando la crescita avviene dall'interno del condotto ed è accompagnata dall'allargamento e frantumazione della superficie esterna del duomo (*carapace*), i prodotti più recenti si trovano nella parte più interna dell'edificio, il duomo può avere la sommità depressa in seguito al ritiro del magma nel condotto. Duomo esogeno: quando la lava fuoriesce dal condotto, eventualmente perforando il carapace precedente, ma essendo molto viscosa non dà luogo a una colata e si accumula nelle vicinanze del punto di emissione, la parte apicale di un duomo esogeno può presentare una forma depressa che coincide con la zona di emissione delle lave.

FALESIA: scarpata molto ripida formatasi per intensa azione erosiva del mare sulla costa rocciosa.

FUMAROLE: emissioni naturali di miscele aeriformi a prevalenza di vapore d'acqua. La temperatura delle fumarole che emettono vapore secco può raggiungere valori di diverse centinaia di gradi centigradi. La temperatura delle fumarole a vapore saturo è invece prossima alla temperatura di ebollizione dell'acqua alla quota dell'emergenza.

IGNEA: roccia magmatica.

ISOPACA: (in inglese, isopach) linea che in una carta unisce i punti di uguale spessore di una formazione geologica.

JUVENILE: si definiscono con questo termine i componenti di un deposito piroclastico che sono parte del magma ancora fluido al momento dell'eruzione. Juvenile si contrappone a litico, termine che indica i clasti che fanno parte di rocce già esistenti prima dell'eruzione.

LAPILLI: frammenti piroclastici di dimensioni comprese tra 2mm e 64mm. Possono essere di natura juvenile o litica. Quando consolidati formano il tufo a lapilli (lapillistone).

LAVA: è il termine utilizzato per indicare il magma, totalmente o parzialmente fuso, quando questo giunge in superficie in seguito a una eruzione effusiva o moderatamente esplosiva. Il termine lava è esteso anche alle rocce derivate dalla solidificazione del magma eruttato. Nella quasi totalità dei casi la lava è composta da materiale silicatico, anche se è noto almeno un caso di vulcano attivo che emette lava carbonatica (Oldoinjo Lengai, Tanzania). La composizione del fuso silicatico è molto variabile e il contenuto in SiO_2 è generalmente compreso nell'intervallo 45-75% (in peso).

LAVA AA: vengono chiamate con il termine hawaiano *aa* quelle lave basaltiche che si presentano con una superficie formata da blocchi di lava con spigoli vivi e con dimensioni fino a un metro.

LAVA A BLOCCHI: con questo termine si indicano le colate con morfologia superficiale caotica caratterizzata da campi di blocchi da metrici a decametrici. Queste lave vengono anche definite autobrecciate, la frantumazione avviene a causa dell'elevata viscosità.

LAVE A CUSCINO: (pillow lava) lave prodotte da eruzioni basaltiche sottomarine; si presentano come blocchi rotondeggianti, con dimensioni che variano da pochi centimetri fino a qualche metro. I pillow sono caratterizzati da una superficie liscia e vetrosa e da fratture concentriche e radiali; la loro frantumazione origina ialoclastiti.

LAVA PAHOEHOE: con il termine hawaiano pahoehoe si indicano le colate basaltiche molto fluide che presentano una superficie liscia, con strutture a corde più o meno regolari.

LITICO: si definiscono con questo termine i componenti di un deposito piroclastico che non sono parte del magma che era fluido al momento dell'eruzione. I litici si dividono in congeniti, accessori e accidentali. I litici congeniti sono frammenti di origine magmatica, non vescicolati, facenti parte del magma che ha generato l'eruzione e solidificati prima della stessa. I litici accessori sono frammenti di roccia di qualsiasi natura, già esistenti prima dell'eruzione (rocce del basamento) ed emessi durante l'eruzione stessa. I litici accidentali sono clasti ripresi dal terreno e inglobati in un flusso piroclastico o in un surge durante lo scorrimento al suolo.

MAGMA: il magma è una sostanza naturale ad alta temperatura, che costituisce un sistema eterogeneo contenente una prevalente fase liquida, generalmente di composizione silicatica, una fase solida minerale e una fase gassosa in quantità variabili. Il magma si forma quando nel mantello terrestre o nella crosta si verificano condizioni di temperatura e pressione dei fluidi tali da determinare la fusione parziale delle rocce. Quando un magma raggiunge la superficie terrestre viene chiamato lava. La composizione del fuso silicatico è molto variabile e il contenuto in SiO₂ è generalmente compreso nell'intervallo 45-75% (in peso).

NUBE ARDENTE: termine in disuso, lo stesso che deposito di flusso di blocchi e cenere.

OSCILLAZIONI EUSTATICHE: variazioni relative di livello tra le masse oceaniche e quelle continentali.

OSSIDIANA: vetro vulcanico di composizione acida (usualmente riolitica), colore nero o comunque molto scuro, caratterizzato da fratture concoidi. Talvolta si presenta bandato e con rare microliti e sferuliti.

PAROSSISMO: complesso dei fenomeni esplosivi coi quali un vulcano entra in attività.

PIROCLASTICO: termine utilizzato in riferimento ai depositi vulcanoclastici la cui frammentazione deriva da attività vulcanica esplosiva. I depositi piroclastici possono avere caratteristiche diverse in funzione dei meccanismi di trasporto e sedimentazione (flusso, surge e caduta).

POMICE: termine adimensionale usato per indicare frammenti juvenili di colore chiaro, con bassa densità, molto vescicolati e vetrosi con eventuali cristalli. Si tratta di prodotti di eruzioni esplosive che coinvolgono magma viscoso, acido o intermedio. La densità media varia con l'inverso della granulometria e i clasti più grandi, quando si depositano sull'acqua, possono essere in grado di galleggiare. In funzione della granulometria si usano i termini bombe o blocchi pomicei (>64mm), lapilli pomicei (2-64mm) e cenere (<2mm).

SOLFATARA: termine obsoleto indicante un'area di diffusa alterazione idrotermale, con attività fumarolica che deposita zolfo.

STRATOVULCANO: con questo termine (sinonimo di vulcano composito) si indicano i vulcani poligenetici formati da strati di prodotti sovrapposti, che derivano da alternate fasi di attività effusiva ed esplosiva (colate di lava e depositi piroclastici). Questo tipo di vulcani è generalmente rappresentato da un cono con diametro dell'ordine di parecchi chilometri o decine di chilometri, fianchi acclivi ed un cratere sommitale, anche se la forma può essere estremamente irregolare in seguito a collassi, crescita di edifici laterali, etc.

STRUTTURE DI DEGASSAZIONE: strutture sub-verticali prodotte dal fenomeno di degassamento delle colate piroclastiche. Si distinguono le strutture prodotte dalla fuoriuscita dei gas surriscaldati, che causano il semplice allontanamento selettivo delle particelle fini, e le tracce di fumarizzazione fossile, con deposizione di minerali secondari.

TEPHRA: termine collettivo per tutti i depositi piroclastici a prescindere dal loro meccanismo di deposizione e dal loro grado di saldatura.

TUFO: termine generale usato per indicare una roccia piroclastica saldata composta prevalentemente da particelle con dimensione della cenere. Il passaggio da depositi cineritici

non consolidati a tufo viene favorito dalla trasformazione dei vetri vulcanici in minerali di alterazione, quali le zeoliti.

UNITÀ DI FLUSSO: un'unità di flusso è costituita da una quantità finita di lava, emessa in continuazione da un centro eruttivo, che scorre lungo i fianchi di un vulcano mantenendosi fluida per tutto il suo percorso. In sezione verticale un'unità di flusso è costituita da una porzione di lava massiva, limitata a tetto e a letto da parti scoriacee più o meno sviluppate. Il concetto di unità di flusso si applica anche ai depositi di flusso piroclastico, quando è possibile riconoscere, in un deposito derivato da un singolo evento eruttivo, flussi distinti associati alle diverse fasi dell'eruzione.

VELOCITÀ DI VESCICOLAZIONE: velocità di formazione di cavità vescicolari.

VULCANO: l'insieme delle strutture dovute alla risalita del magma verso la superficie terrestre e alla sua fuoriuscita o alla fuoriuscita di gas o fluidi ad esso collegati. Interferenza del magma con la superficie topografica.

VULCANO A SCUDO: con questo termine si indicano i vulcani poligenetici costruiti in seguito a frequenti eruzioni di lava fluida basaltica dai crateri sommitali o dai fianchi dell'edificio. I vulcani a scudo sono dei coni con fianchi a bassa inclinazione (circa 5°), spesso con centri eruttivi laterali ed eccentrici e con zone di effusione allungate, note come rift vulcanici. Sulla base delle dimensioni si distinguono vulcani a scudo di tipo islandese (diametro basale di qualche km), Galapagos (diametro di poche decine di km) e hawaiano (diametro di decine o centinaia di km).

VULCANO MONOGENETICO: vulcano che si forma nell'ambito di un unico evento eruttivo principale.

VULCANO POLIGENETICO: vulcano che si costruisce gradualmente in seguito a ripetute eruzioni

Ringraziamenti

Durante i miei tre anni di dottorato ho avuto la fortuna di incontrare persone il cui ricordo mi accompagnerà sempre con grande gioia. Colgo l'occasione per ringraziarle.

Ringrazio, innanzitutto, il prof. Mazzolani per avermi dato la possibilità di fare questa esperienza e perché lavorare al suo fianco è stato un vero onore.

Ringrazio l'ing. Faggiano per avermi guidata ed avermi spronata sempre a far meglio.

Ringrazio il prof. Zuccaro ed i suoi collaboratori del centro PLINIVS, Francesco, Paola, Stefano e Peppe, per la disponibilità e l'aiuto dimostratomi durante tutta la mia attività di ricerca.

Ringrazio gli ingegneri Antonio Formisano e Maurizio Indirli per avermi sostenuto con professionalità, cordialità e grande simpatia.

Ringrazio l'Ente per le Ville Vesuviane, i comuni di Ercolano, Portici, San Giorgio a Cremano e Torre del Greco, le direzioni delle scuole di Torre del Greco e dell'Hotel Villa Aprile di Ercolano per aver reso possibile la raccolta dei dati sul territorio vesuviano.

Ringrazio i tesisti e gli studenti per aver lavorato con me sempre con grande impegno.

Ringrazio tutti gli amici, Anna, Antonello, Carmine Castaldo, Carmine Citro, Gaetana, Gilda, Giulio, Luigi, Luisa, Maria Rosaria, Mario, Matteo, Peppe, Pier Paolo, Roberta, Tony e Vincenzo, che ho avuto l'onore ed il privilegio di incontrare durante questa avventura: vi porterò sempre nel cuore.

Ringrazio la mia famiglia per avermi sostenuto e sopportato ...